

Indagini non distruttive con neutroni: alcuni casi di studio, da minuscole filigrane dorate a catene di ferro giganti

Daniela Di Martino

daniela.dimartino@unimib.it

Dipartimento di Fisica "Giuseppe Occhialini"

Università degli Studi di Milano-Bicocca

pagina a fronte

Fig. 1

Alcuni frammenti della filigrana dorata che adorna la Croce di Chiaravalle, oggetto di analisi con neutroni (credit Franco Blumer).

Abstract

Neutrons, as a function of their energy and wavelength, are highly penetrating in matter and allow non-invasive analysis in materials, therefore being a well-suited tool to support heritage science studies. The Physics Department at the University of Milano-Bicocca has long standing collaborations with neutron facilities worldwide, and has coordinated several measurements campaigns in heritage science. In particular, two case studies will be presented. The first, concerning the characterization of the iron tie rods of the Milan Cathedral that act as a static consolidation between the pillars. The second, concerning the analysis of tiny gold filigrees of the Chiaravalle Cross, a precious and complex masterpiece of jewelry, preserved at the Milan Cathedral Museum.

Key-words

Non-destructive investigations, Neutron imaging, Milan Cathedral tie-rods, Chiaravalle Cross.

Introduzione

Si può vedere una rosa in un contenitore di piombo? Questa domanda provocatoria vuole porre l'attenzione su cosa riescono a vedere i nostri occhi e su possibili indagini che possono ottenere dettagli invisibili alla nostra vista.

Nel campo del patrimonio culturale le campagne di indagini scientifiche rivestono sempre più importanza. Anche le persone più esperte (dallo storico dell'arte, al restauratore e al conservatore) hanno spesso l'esigenza di ottenere risposte sulla composizione dell'opera (per individuare le materie prime ed eventuali provenienze geografiche e storiche), sulla tecnologia di produzione e sulla collocazione cronologica. Le indagini scientifiche sono sempre più all'avanguardia e possono fornire elementi importanti per aiutare lo storico, il restauratore e il conservatore nella lettura approfondita dell'opera, sempre nell'ottica di conoscere, conservare e valorizzare il patrimonio culturale.

Ricordiamo che l'Agenda 2030 (UN, 2030), coi suoi 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDGs), riconosce l'importanza del patrimonio culturale come strumento per raggiungere la sostenibilità. In particolare, il traguardo 11.4 esorta a potenziare gli sforzi per proteggere e salvaguardare il patrimonio culturale.



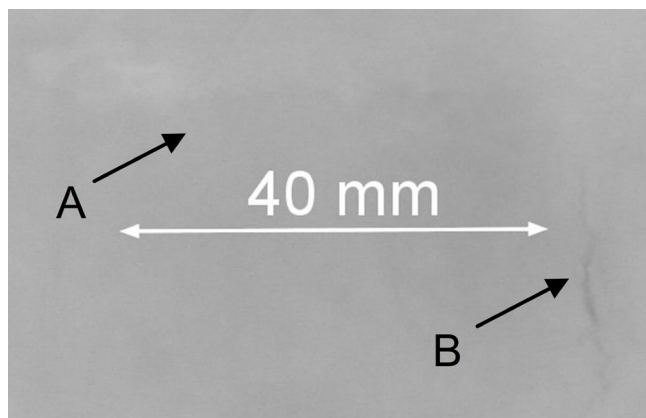
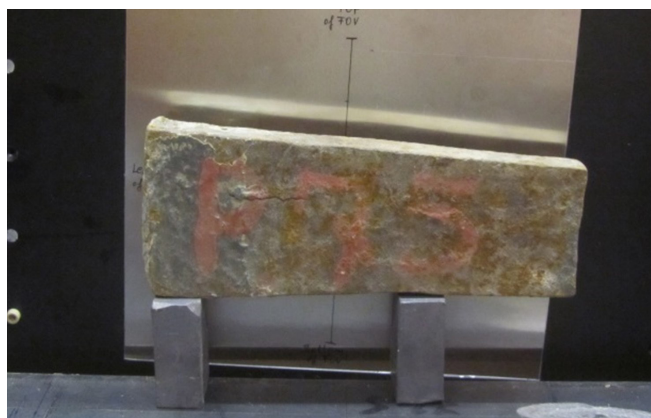


Fig. 2
Cuneo del Duomo
di Milano, fotografia
-immagine in alto
e radiografia con
neutroni -immagine in
basso, dove due difetti
sono indicati dalle
frece (A e B) (credit
Veneranda Fabbrica e
BNC, Budapest).

Tra le tecniche all'avanguardia e non distruttive per analizzare materiali, strutture e composizioni di oggetti d'arte e reperti archeologici ci occuperemo in particolare di quelle che utilizzano fasci di neutroni.

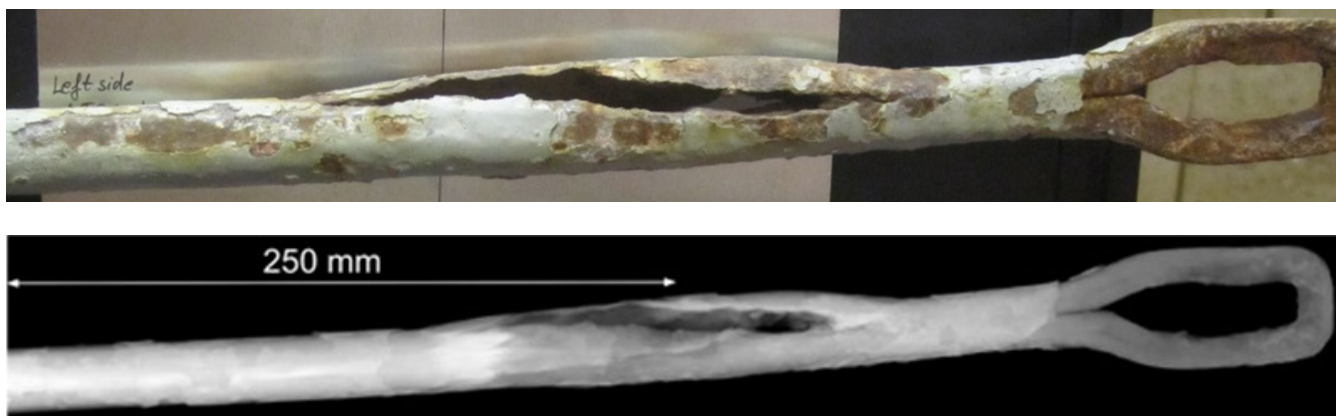
Il neutrone è una particella neutra: non ha carica elettrica e può penetrare la materia in profondità, interagendo coi materiali in diversi modi, a seconda degli elementi che li compongono. I nuclei di alcuni elementi (come B, Li, Cd e Gd) catturano i neutroni incidenti a bassa velocità. Altri materiali (per es. quelli contenenti Al o Pb) interagiscono poco coi neutroni (sono praticamente trasparenti). I neutroni, in funzione della loro energia e della loro lunghezza d'onda, hanno un'elevata penetrazione nella materia e consentono un'analisi non invasiva e non distruttiva dei materiali. Sono quindi uno strumento particolarmente adatto negli studi di caratterizzazione dei beni culturali. Il Dipartimento di Fisica "Giuseppe Occhialini" dell'Università degli Studi di Milano-Bicocca ha una collaborazione di lunga data con molte infrastrutture di ricerca con sorgenti di neutroni in tutto il mondo e ha coordinato diverse campagne di misura, tutte non distruttive, per lo studio del patrimonio culturale (Di Martino et al. 2018a; Di Martino D. et al. 2018b; Di Martino et al. 2019).

Le tecniche neutroniche sono tutt'ora poco utilizzate, forse per la difficoltà di non poter ancora svolgere misure *in situ*. I più diffusi metodi di misura basati sui neutroni e le loro applicazioni nel campo dei beni culturali sono raccolti in una recente pubblicazione (Kardjilov, Festa 2017); in particolare, l'imaging neutronico ha molte potenzialità per caratterizzare diverse tipologie di materiali in vari settori (Kardjilov et al. 2011). Nel seguito verranno brevemente esposti due casi studio significativi.

Imaging neutronico di catene di ferro provenienti dal Duomo di Milano

Le catene del Duomo di Milano sono degli elementi di rinforzo (contro le spinte laterali) applicate tra le colonne a circa 30 metri di altezza. Essendo stati posizionati in opera più di 500 anni fa, sono comunque soggetti a degrado, e una catena nel 2012 è stata trovata una catena rotta, che è stata sostituita con una catena di fabbricazione recente. La catena originale è diventata oggetto di studio tramite diverse tecniche di analisi (anche da parte del Politecnico di Milano, che coordina varie azioni di monitoraggio del Duomo di Milano).

Sono sempre più necessari studi multidisciplinari e, se possibile, non distruttivi per valutare lo stato di conservazione. Lo studio condotto mirava ad una caratterizzazione



più approfondita del materiale e all'identificazione dei difetti locali, anche per fare poi un confronto con tecniche differenti utilizzabili *in situ*.

Dopo una campagna di misura presso il centro ISIS-RAL (UK) di una porzione di questa catena fratturata (lunga 80 cm, per una sezione di 8cm x 8cm), sono stati eseguiti ulteriori esperimenti di imaging di neutroni termici sulla stazione di imaging RAD del Centro Neutroni di Budapest su un cuneo (coevo alla catena sostituita) e ad altre catene di ferro. I dettagli di questi esperimenti sono stati pubblicati (Di Martino et al. 2018b) ed alcuni dettagli sono visibili nella figura 2. Nella figura 2a due difetti del cuneo di ferro sono indicati dalle frecce. La crepa contrassegnata da A era visibile a occhio nudo; la crepa contrassegnata da B era invece nascosta. Quest'ultima dev'essere quindi posizionata nella parte interna del corpo di ferro, in questo caso più o meno perpendicolarmente alla superficie.

La cricca B ha una lunghezza di circa 20 mm e una larghezza di circa 0,7 mm. Tali vuoti visibili o nascosti possono indebolire notevolmente la resistenza del materiale. Nella figura 3 sono ben riconoscibili le crepe allungate nel materiale dell'asta lunga. Queste crepe non erano visibili a occhio nudo. Il percorso dei vuoti segue la curvatura del corpo di ferro. Ciò indica che la tensione e le sollecitazioni su questa parte del tirante erano troppo elevate; forse non solo per questo tirante, ma anche per altri. Altri dettagli e osservazioni tecniche sono comunque disponibili in letteratura (Di Martino et al. 2018b). Le indagini con neutroni hanno permesso di evidenziare in maniera non distruttiva la presenza di difetti interni al materiale che non erano stati identificati con altre tecniche, consentendo quindi di testare anche metodologie adatte al monitoraggio *in situ*.

La filigrana della Croce di Chiaravalle

La Croce di Chiaravalle è una croce processionale risalente alla seconda metà del duecento, donata, secondo la tradizione, dal Vescovo e Signore di Milano Ottone Visconti all'abate di Chiaravalle Paolo da Besana (XIII secolo). Si tratta di una complessa costruzione di oreficeria, costituita da lamine d'argento e dorate, in abbinamento a filigrane, cristalli, gemme, pietre dure, cammei, diaspro rosso.

La particolarità di quest'opera, di proprietà dei Padri Oblati, ma custodita dal Museo del Duomo di Milano, è che diversi tratti stilistici appaiono chiaramente successivi alla presunta epoca di realizzazione. La croce è stata restaurata nell'ambito della

Fig. 3
Catena (esterna al Duomo di Milano), fotografia -immagine in alto e radiografia con neutroni -immagine in basso, dove alcune fratture interne sono ben visibili (credit Veneranda Fabbrica e BNC, Budapest).

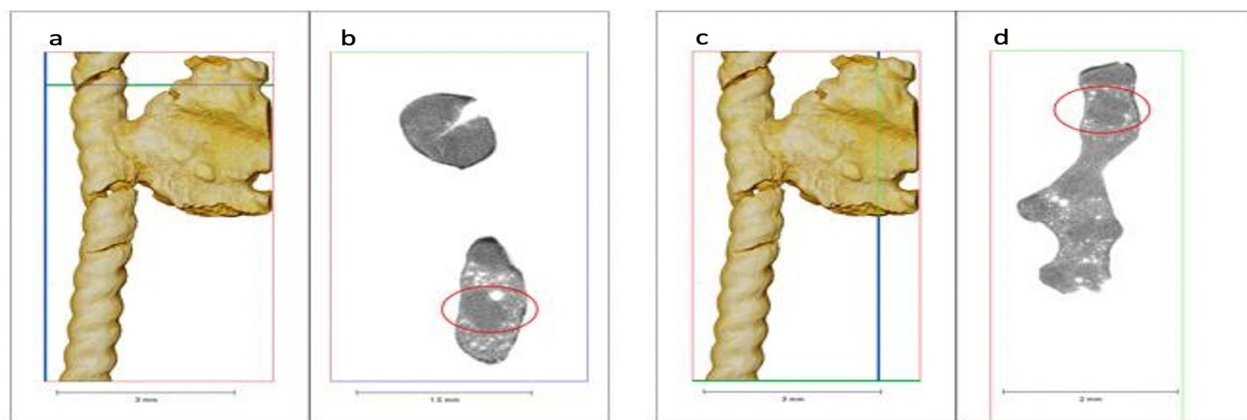


Fig. 4

Nei 4 riquadri sono mostrate le riproduzioni della filigrana (a, c) e le corrispondenti sezioni ottenute dalla tomografia neutronica.

La prima sezione è mostrata in b (lungo la linea verde in a) e una seconda sezione si trova in d (lungo la linea verde mostrata in c). In entrambe le sezioni i cerchi rossi evidenziano delle forme squadrate e non tonde (che si riferiscono proprio alla sezione del filo che compone la filigrana).

XVII edizione di Restituzioni (2016), programma biennale di restauri di opere d'arte appartenenti al patrimonio del Paese, promosso e curato da Intesa Sanpaolo, in collaborazione con la Soprintendenza Belle Arti e Paesaggio per le province di Milano, Bergamo, Como, Lecco, Lodi, Monza-Brianza, Pavia, Sondrio e Varese, e ammirata all'interno della mostra "La Bellezza Ritrovata", a Gallerie d'Italia (piazza della Scala, Milano, aprile-luglio 2016).

Durante il restauro, il Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Milano -Bicocca, insieme a diverse realtà universitarie e private, ha eseguito varie indagini scientifiche relative alla natura dei materiali ed alla datazione del manufatto. I principali risultati sono stati presentati in un convegno e pubblicati (Benati, Di Martino 2017, Di Martino et al. 2019). Recentemente, vista la difficoltà nell'identificare la tecnologia di produzione della filigrana, è stato condotto un nuovo esperimento di imaging neutronico ad alta risoluzione spaziale presso la facility ANSTO (Sydney, Australia) su un piccolo campione di filigrana dorata. I risultati (Vigorelli et al. 2025) riguardano soprattutto la morfologia del filo, come evidenziato dalla figura 4, dove sono mostrate le immagini in varie sezioni (ottenute dalla tomografia a neutroni). In particolare, i cerchi rossi mettono in evidenza delle sezioni di fili non tondi, ma squadrate, suggerendo che possano essere state usate trafilare quadrate e non tonde, come consuetudine veneziana nel XIII secolo (si veda per esempio Costanza Cucini, in Benati, Di Martino 2017).

Conclusioni

In conclusione, abbiamo mostrato come le tecniche neutroniche siano state impiegate in modo efficace nello studio di due manufatti significativi: minuscoli frammenti di un'antica filigrana dorata e imponenti catene di ferro. Il vantaggio principale è stato che tutte le tecniche basate su neutroni sono non invasive e non distruttive.

Sono stati eseguiti con successo esperimenti di imaging termico-neutronico su tiranti in ferro provenienti dal Duomo di Milano restituendo lo stato di conservazione degli esemplari e fornendo indicazioni sulle tecniche di fabbricazione. Inoltre, le immagini acquisite potrebbero essere un test di confronto per nuove tecniche di monitoraggio da utilizzare *in situ*.

Per quanto riguarda la filigrana dorata della Croce di Chiaravalle ulteriori informazioni rilevanti sul filo utilizzato si trovano nelle immagini tomografiche: è stato confermato l'uso di un filo a sezione quadrata, visibile soprattutto nelle sezioni laterali della parte a

spirale. Questa indicazione sarebbe molto importante per l'associazione alla produzione veneziana di filigrana nel XIII secolo (ulteriori ricerche bibliografiche sono in corso).

Questi casi studi dimostrano che presso i laboratori di ricerca dotati di sorgenti di neutroni possono essere indagati sia campioni molto piccoli che campioni molto grandi, senza preparazione o campionamento e in modo non invasivo quando altre tecniche sono inefficaci.

Dobbiamo però menzionare anche alcuni punti deboli. I neutroni sono costosi e non facilmente disponibili, e gli oggetti devono essere trasportati e conservati in modo sicuro. L'interazione dei neutroni è debole e quindi spesso è necessario un lungo tempo di misurazione e l'attivazione deve essere presa in considerazione con attenzione. Tuttavia, le tecniche basate sui neutroni sono in continua evoluzione e consentono di raggiungere risoluzioni spaziali sempre più elevate e molti dettagli (anche discriminando singole fasi o elementi) all'interno dei manufatti.

Infine, tornando alla domanda di partenza: "si può vedere una rosa all'interno di un contenitore di piombo"? La risposta è sì, se usassimo dei neutroni¹.

¹ Si ringraziano gli enti che hanno messo a disposizione i beni dei casi studi, i curatori, i restauratori e gli storici che hanno collaborato alle campagne di misure, tutti gli *instrument scientists* delle *facilities* presso cui sono state condotte le misure con neutroni e tutti i colleghi che hanno contribuito agli studi (maggiori dettagli sono presenti negli articoli citati).

Bibliografia

BENATI G., DI MARTINO D. (a cura di) 2017, *La Croce di Chiaravalle. Approfondimenti storiocientifici in occasione del restauro*, atti del convegno, Milano.

DI MARTINO, D. ET AL. 2018a, *From tiny gold filigrees to majestic iron tie rods: Neutron facilities for the benefit of cultural heritage*, «The European Physical Journal Plus», vol. 133(9). <https://doi.org/10.1140/epjp/i2018-12232-6>.

DI MARTINO D. ET AL. 2018b, *A neutron diffraction and imaging study of ancient iron tie rods*, «Journal of Instrumentation», vol. 13(5). <https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/05/C05009>.

DI MARTINO D. ET AL. 2019, *The Chiaravalle Cross: Results of a*

Multidisciplinary Study, «Heritage», vol. 2(3), pp. 2555-2572. <https://doi.org/10.3390/heritage2030157>.

DI MARTINO D. ET AL. 2025, *When from Technology Comes Beauty: A Glass-Gem Case Study to Promote Inclusive and High-Quality Learning Paths in Heritage Science*, «Heritage», vol. 8(2), p. 41. <https://doi.org/10.3390/heritage8020041>.

KARDJILOV N. ET AL. 2011, *Neutron imaging in materials science*, «Materials Today», vol. 14 (6), pp. 248-256. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(11\)70139-0](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(11)70139-0).

KARDJILOV N., FESTA G. 2017 (Eds.), *Neutron Methods for Archaeology and Cultural Heritage*, Springer.

RESTITUZIONI, 2016 in *Restituzioni. Tesori Restaurati*, edizione 2016, Croce di Chiaravalle-<https://restituzioni.com/opere/croce-di-chiaravalle/> (05/2025).

UN 2030, *Agenda 2030, United Nations*. Available online: <https://sdgs.un.org/2030agenda> (05/2025).

VIGORELLI L. ET AL. 2025, *High resolution neutron tomography as non-invasive tool for the study of a filigree from the Medieval Chiaravalle Cross*, «Archaeological and Anthropological Sciences», vol. 17, p. 138. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12520-025-02254-y>.