

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PAVIA
DIPARTIMENTO DI FISICA
CORSO DI LAUREA IN FISICA

**Radiodatazione tramite carbonio ^{14}C e confronto
con altre tecniche di
datazione(termoluminescenza).**

Relatore:
Prof.ssa Salvini Paola

Tesi di laurea di:
Canevari Simone

Anno Accademico 2021/2022

Indice

1	Sommario	2
2	Principi di radiodatazione	3
2.1	Teoria dei decadimenti radioattivi	3
2.2	La radiodatazione e le fonti di radionuclidi	5
2.2.1	Origine Primordiale	5
2.2.2	Origine cosmogenica	5
3	Il ^{14}C	6
3.1	L'origine del ^{14}C	6
3.2	Il ^{14}C in natura	9
4	Radiodatazione tramite ^{14}C	10
4.1	Limiti della tecnica	10
4.2	Tecniche di misurazione	10
4.2.1	Gestione della radiazione di fondo	11
4.3	Preparazione dei reperti per la misura	11
4.4	Efficienza delle tecniche di misura	12
4.5	Affidabilità della misura	12
4.6	Il problema della calibrazione	15
4.6.1	La dendrocronologia	16
4.6.2	Il metodo Uranio-Torio	17
4.6.3	La cronologia delle varve	18
5	La termoluminescenza	20
5.1	Introduzione alla tecnica	20
5.2	Datazione tramite termoluminescenza	21
5.3	Termoluminescenza spuria	24
5.4	Apparato sperimentale di misura	24
6	Tecniche di radiodatazione al confronto: il caso delle ceramiche di Gasya	26
6.1	Metodologia di misura tramite ^{14}C	26
6.2	Metodologia di misura tramite termoluminescenza	26
6.3	Confronto tra risultati tramite ^{14}C e termoluminescenza	27
7	Tecniche di radiodatazione al confronto: il caso della cattedrale di San Lorenzo	29
7.1	Metodologie e tecniche utilizzate per la datazione al ^{14}C	29
7.2	Metodologie e tecniche utilizzate per la datazione tramite termoluminescenza	30
7.3	Risultati tramite datazione al ^{14}C	30
7.4	Risultati tramite termoluminescenza e conclusioni	31
8	Bibliografia	33

1 Sommario

Nella parte iniziale di questa tesi si trova un'introduzione ai principi basilari delle tecniche di radiodatazione, la loro applicabilità ai casi possibili e la loro efficienza di misura.

In seguito viene approfondita la radiodatazione al ^{14}C e il problema della sua calibrazione. In particolare la datazione con ^{14}C è basata sulla ipotesi di Libby, che assume una percentuale di C^{14} in atmosfera costante nel tempo. Questa ipotesi è però molto approssimata e si ovvia a questo problema tramite la calibrazione utilizzando un'altra tecnica di datazione.

Nel Cap.5 si illustrano i principi della tecnica di datazione con termoluminescenza. Questo tipo di datazione viene applicata alle ceramiche, potendo risalire alla data della loro prima cottura. La data determinata tramite termoluminescenza è spesso caratterizzata da un errore maggiore rispetto alla datazione tramite ^{14}C ma, rispetto a quest'ultima, non necessita di calibrazione. La termoluminescenza necessita però della conoscenza della dose radioattiva a cui è stato esposto il campione nel tempo: questa risulta essere la fonte principale di errore per questa tecnica di datazione. Negli ultimi capitoli si trattano due casi particolari. Il primo nel quale vengono messi a confronto la datazione con ^{14}C , eseguita su reperti calcarei o su torba di focolari di insediamenti umani paleolitici, e la datazione con termoluminescenza eseguita sulle ceramiche ritrovate negli stessi insediamenti; nel secondo caso verranno svolti i medesimi confronti sulla struttura della cattedrale di San Lorenzo a Cuneo sul suo fonte battesimale.

In entrambi i casi presi in esame la datazione calibrata con ^{14}C risulta in accordo con la datazione tramite termoluminescenza, confermando così la validità della calibrazione e dei metodi di datazione sfruttando due tecniche completamente indipendenti.

2 Principi di radiodattazione

Le tecniche di radiodattazione si basano sulla misura della concentrazione relativa di un particolare radioisotopo all'interno di un reperto rispetto ad altri isotopi, l'età del reperto si ricava ponendo delle ipotesi sulla concentrazione iniziale del radioisotopo e conoscendo il suo andamento nel tempo tramite l'uso della legge di decadimento. Cerchiamo in seguito di spiegare i principi teorici alla base di queste tecniche.

2.1 Teoria dei decadimenti radioattivi

I decadimenti radioattivi sono processi statistici nei quali un nucleo iniziale emette energia e/o particelle raggiungendo uno stato ad energia inferiore. L'andamento di tali fenomeni, nonostante vari molto a seconda dell'elemento preso in esame, seguono la seguente legge: *se all'istante t sono presenti $N(t)$ nuclei radioattivi di una specie, il numero di nuclei $N_d(t)$ che si disintegra tra t e $t + dt$ è in media:*^[1]

$$dN_d(t) = -dN(t) = \lambda N(t)dt \quad (1)$$

Con λ costante di decadimento a cui assoceremo $\tau = \frac{1}{\lambda}$ il tempo di vita medio di un nucleo radioattivo.

Da essa può essere ricavata, tramite integrazione e indicando N_0 il numero di nuclei presenti a $t=0$ di riferimento, la popolazione statistica dei nuclei radioattivi ad un certo tempo t :

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

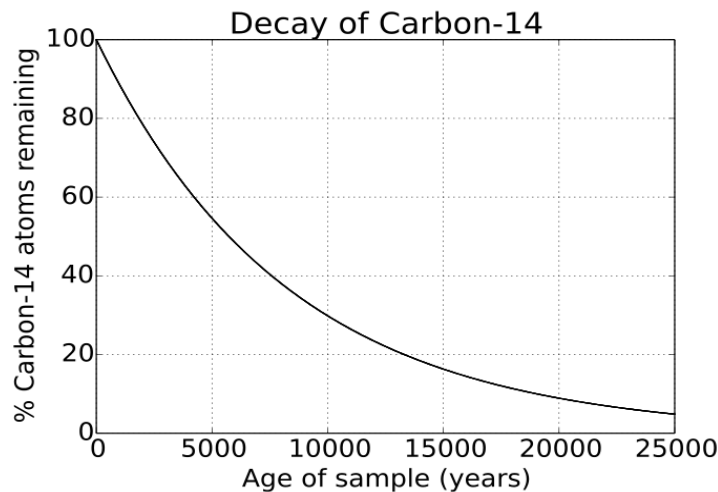


Figura 1: Andamento della concentrazione di ^{14}C nel tempo in un campione ¹

Da qui possiamo ottenere successivamente l'equazione che ci permette di metter in relazione la variazione di popolazione di nuclei radioattivi con la variazione di tempo:

$$\Delta N_d = N_0(e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}) \quad (3)$$

I due parametri chiave della trattazione sono il tempo di dimezzamento e l'attività dell'elemento preso in esame.

Il primo indica il tempo medio necessario affinché la popolazione di nuclei radioattivi si dimezzi e viene indicato con $t_{\frac{1}{2}}$ e ottenibile semplicemente da:

$$\frac{1}{2}N_0 = N_0e^{-\lambda t_{\frac{1}{2}}} \implies t_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (4)$$

Mentre con attività si intende il numero di decadimenti al secondo e viene definita come:

$$A(t) = \frac{dN_d(t)}{dt} = -\frac{dN(t)}{dt} = \lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad (5)$$

Nei casi di radiodatazione, dobbiamo tenere conto del fatto che dobbiamo utilizzare l'attività del campione ad un determinato tempo t . Per utilizzare tale attività $A(t)$ posso effettuare un conteggio in un intervallo $\Delta t = t_1 - t_2 \ll \frac{1}{\lambda}$ da cui vale la seguente relazione:

$$A(t) \cong \lambda N_0 \quad (6)$$

Un'ulteriore condizione da osservare è se il radionuclide che stiamo andando ad osservare fa parte, e in caso in che posizione, di una catena di decadimento che potrebbe alimentarne la popolazione andando a creare effetti di compensazione. Detti A e B due elementi di una catena di decadimenti successivi avremo:

$$N_A(t) = N_A(0)e^{-\frac{t}{\tau_A}} \quad (7)$$

$$N_B(t) = N_A(0)(1 - e^{-\frac{t}{\tau_A}}) + N_B(0) \quad (8)$$

E così via per ogni elemento successivo della catena fino al raggiungimento di un elemento stabile siccome nella valutazione della radioattività si utilizza l'equilibrio secolare degli elementi di una famiglia radioattiva.

Infine dobbiamo andare a tenere in considerazione i casi in cui il radionuclide di nostro interesse non ha origine da altre sostanze ma da differenti processi (come l'interazione coi raggi cosmici) caratterizzati da un certo tasso di produzione naturale K (costante nel tempo come richiesto dalle ipotesi iniziali):

$$dN(t) = K dt - \lambda N(t) dt \quad (9)$$

da cui, tramite integrazione possiamo ricavare l'andamento della popolazione:

$$N(t) = \frac{K}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t}) \quad \text{con } t \gg \frac{1}{\lambda} \quad \text{da cui } \frac{K}{\lambda} = K\tau \quad (10)$$

¹<https://www.radiation-dosimetry.org/what-is-carbon-14-production-properties-decay-definition/>

2.2 La radiodattazione e le fonti di radionuclidi

Quando andiamo a svolgere una misura di radiodattazione di un campione ci interessiamo della differenza di attività relativa di un determinato radioisotopo rispetto ad un secondo elemento o ad un isotopo stabile dello stesso elemento all'interno di un campione. In particolare utilizzeremo il valore iniziale di tale concentrazione per andare a stimare l'"età" di un reperto basandoci sulle proprietà di decadimento del radionuclide.

Preso un campione inizialmente contenente N_0 nuclei radioattivi caratterizzato da una attività A_0 la legge di decadimento ci permette di mettere in relazione il tempo t trascorso dal momento di inizio di decadimento ed il momento della misura secondo la legge:

$$t = \tau \ln \left(\frac{N_0}{N(t)} \right) = \tau \ln \left(\frac{\lambda N_0}{A(t)} \right) = \tau \ln \left(\frac{A_0}{A(t)} \right) \quad (11)$$

Questo approccio porta con sé due problemi: il primo è relativo al fatto che tale relazione richiederebbe una conservazione del campione priva di contaminazioni esterne mentre il secondo problema incorre nel caso in cui il radionuclide che utilizziamo per la misurazione faccia parte di una *famiglia radioattiva* in cui più nuclei siano radiogenici dobbiamo dunque tenere conto anche dei processi decadimento del nucleo padre che andrà ad alimentare la popolazione del radionuclide preso in esame:

$$t = \tau_A \ln \left(\frac{N_B(t)}{N_A(t)} + 1 \right) \quad (12)$$

L'ultimo fattore di cui dobbiamo tenere conto nell'approcciarci alla radiodattazione è l'origine dei radionuclidi che stiamo studiando. Essa si può distinguere in primordiale e cosmogenica.

2.2.1 Origine Primordiale

In questa categoria ricadono tutti quei radionuclidi che si trovano sulla terra dalle ere di formazione del sistema solare e sono caratterizzati da dei tempi di dimezzamento dell'ordine di $10^9 - 10^{14}$ anni. Tra di essi troviamo: ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th e ^{87}Rb . Come si può notare tra essi si trovano alcuni dei capostipiti delle principali famiglie radioattive aventi gli isotopi stabili del Pb come elemento di arrivo stabile.

2.2.2 Origine cosmogenica

In questa categoria ricadono tutti quei radionuclidi che hanno origine dall'interazione con un raggio cosmico e un nucleo stabile (in atmosfera, nel terreno o in mare) come nel caso del ^{40}K e del ^{14}C . Queste interazioni oltre che essere interessanti per l'origine dei radionuclidi vanno prese in considerazione anche come possibili contaminazioni dei campioni presi in esami in contesti di radiodattazione poiché possono andare a modificare la popolazione statistica del nucleo usato per la radiodattazione.

3 Il ^{14}C

Il ^{14}C è uno dei quindici isotopi del carbonio. In particolare esso è un isotopo naturale radioattivo estremamente utile per le tecniche di radiodatazione grazie alla sua presenza nella materia biologica.

3.1 L'origine del ^{14}C

Esso ha origine principalmente nell'atmosfera terrestre dall'interazione dei raggi cosmici (un neutrone) e degli atomi di ^{14}N .

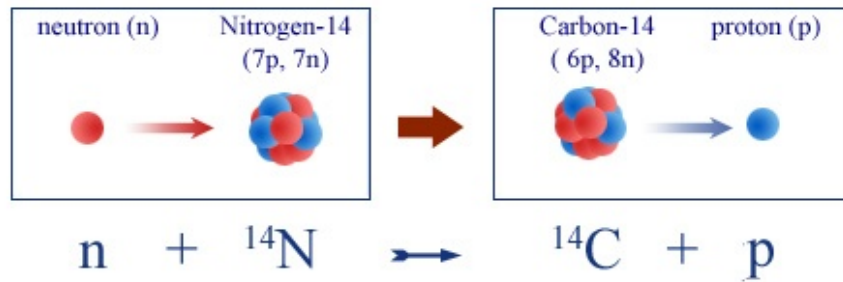


Figura 2: Formazione del ^{14}C in atmosfera. ²

I neutroni sono presenti nei raggi cosmici in genere come prodotto secondario della interazioni dei protoni con i nuclei dell'atmosfera stessa. A seconda della altezza a cui ci troviamo abbiamo diverse composizioni dell'atmosfera a cui possiamo correlare la distribuzione altimetrica di neutroni in atmosfera :

²<https://www.electricalibrary.com/en/2021/01/11/carbon-14-for-dating-part-1/>

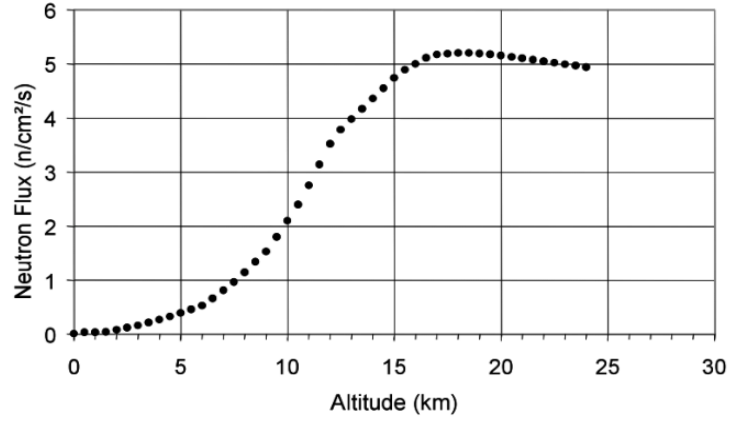


Figura 3: Distribuzione altimetrica di neutroni in atmosfera. ³

Dobbiamo inoltre valutare le reazioni più probabili diverse da quella mostrata precedentemente tra i neutroni e ^{14}N :



Tra queste tre le prime due hanno sezioni d'urto trascurabili mentre l'ultima presenta una grande sezione d'urto anche per basse energie:

³https://www.researchgate.net/figure/Neutrons-flux-in-atmosphere-as-function-of-altitude-at-latitude-of-45-NASA-Langley_fig2_224569278

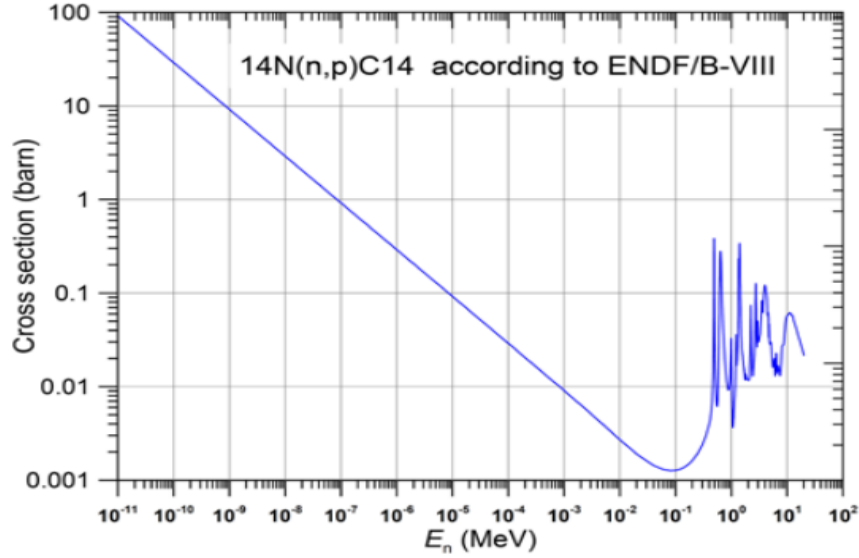


Figura 4: Sezione d'urto in funzione dell'energia di $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$. ⁴

Il ^{14}C in atmosfera si trova solitamente con una abbondanza isotopica relativa media di 1 a 10^{12} rispetto al ^{12}C . Questa concentrazione relativa è particolarmente importante poiché tramite la fotosintesi clorofilliana e la catena alimentare viene assorbito da pressoché tutti gli organismi viventi terrestri e rimane a concentrazione costante al loro interno fino alla morte dell'organismo per poi iniziare a decadere, (siccome l'assimilazione ambientale si interrompe) secondo la propria legge di decadimento radioattivo, in azoto secondo la reazione seguente:

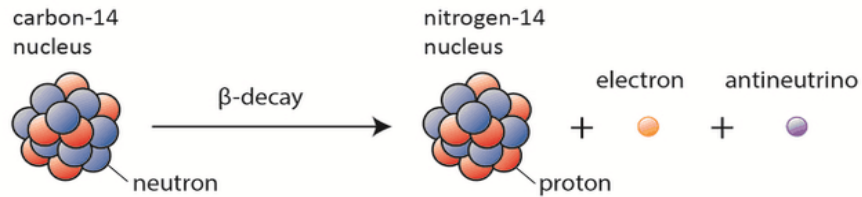


Figura 5: Decadimento β_- del ^{14}C . ⁵

⁴Vladimir I. Lyashuk *Creation of radiocarbon C-14 at thunderstorms*

⁵<https://www.radiation-dosimetry.org/what-is-carbon-14-production-properties-decay-definition/>

Tale reazione è caratterizzata da un'energia $E_\beta = 156.4keV$ e una vita media $\tau = 8267 \pm 58$ anni.

È importante segnalare che, nonostante il flusso di neutroni nell'atmosfera non sia costante (infatti varia con l'intensità e la forma del campo magnetico terrestre) la distribuzione del ^{14}C è omogenea su tutto il pianeta grazie al rimescolamento dei gas atmosferici.

Un altro dei processi di formazione del ^{14}C è data dall'interazione tra raggi cosmici (neutroni) e nuclei di ^{16}O ma la sezione d'urto di queste interazioni è molto più bassa rispetto agli altri canali di produzione che possiamo considerarla trascurabile.

3.2 Il ^{14}C in natura

Una volta prodotti gli atomi di ^{14}C essi interagiscono con l'ossigeno atmosferico andando a formare anidride carbonica secondo le seguenti reazioni:



Una volta formata, l'anidride contenente il ^{14}C inizia ad interagire chimicamente con l'idrosfera e con gli esseri viventi; in particolare con le piante le quali la utilizzeranno nei cicli di fotosintesi clorofilliana assimilando gli atomi di ^{14}C . Successivamente gli erbivori si ciberanno di tali piante assimilando a loro volta il ^{14}C e così via seguendo tutta la catena alimentare fino a i grandi predatori, tra cui l'uomo.

In mare il processo sarà analogo con la differenza che l'inserimento nella catena alimentare marina necessita la previa combinazione chimica tra l'anidride i carbonati e gli ioni bicarbonati disciolti nell'acqua. Quando andiamo a trattare il ^{14}C in mare e in reperti o corpi biologici dobbiamo tenere conto di due fattori: il 93% delle riserve di ^{14}C globali si trovano sui fondali marini (nonostante siano necessari circa 500 anni perché esso raggiunga i fondali tramite tutti i possibili cicli) e che le grandi variazioni di volume, temperatura e Ph degli oceani possono andare a smuovere queste riserve (anche se l'ultimo grandi cambiamento di questo tipo risalga a circa 10000 anni fa.^[1]

4 Radiodatazione tramite ^{14}C

Utilizzando tutte le informazioni ora in nostro possesso andando ad analizzare un generico reperto biologico possiamo andare a stimare la sua età tramite la valutazione relativa di presenza di ^{14}C e ^{12}C infatti indicando con t l'età del reperto può essere ricavata come:

$$t = \tau \ln \left(\frac{N(^{14}\text{C}, 0)}{N(^{14}\text{C}, t)} \right) = \tau \ln \left(\frac{A(^{14}\text{C}, 0)}{A(^{14}\text{C}, t)} \right) \quad (18)$$

con $N(^{14}\text{C}, 0)$ numero di nuclei di ^{14}C contenuti alla morte dell'organismo.

4.1 Limiti della tecnica

Questo approccio richiederebbe quattro condizioni:

1. il reperto è rimasto in un ambiente isolato senza perdita o guadagno di ^{14}C e/o ^{12}C a causa di agenti esterni artificiali.
2. Il reperto è omogeneo riguardo l'età di tutte le sue parti.
3. la quantità di ^{14}C dell'atmosfera con cui il reperto è entrato in contatto è stata sempre costante.
4. la proporzione tra ^{14}C e ^{12}C nel reperto e negli ambienti con cui esso è entrato in contatto sono rimasti costanti rispetto al momento a $t=0$.

Infatti

4.2 Tecniche di misurazione

Per valutare l'età di un reperto occorre quindi misurare l'attività residua posseduta dal campione. A questo scopo potremo utilizzare tre diversi setup di misurazione:

1. Contatore a carbonio solido: esso consiste di un contatore Geiger modificato in cui, quando una particella carica attraversa il gas al suo interno, lo ionizza generando una carica elettrica che viene successivamente ampiamente moltiplicata. Questo dispositivo è estremamente preciso nel valutare il numero di particelle che lo attraversano ma non la loro energia, limitazione che lo ha reso obsoleto negli ultimi decenni.
2. Contatore proporzionale a gas: esso consiste in un contenitore riempito di un mix di gas (CO_2 o CH_4 o C_2H_2) a base di carbonio in cui il suddetto carbonio è stato ottenuto chimicamente dal reperto. Questo sistema nonostante utilizzi gli stessi principi elettromagnetici del precedente è caratterizzato dal fatto che permette di distinguere i segnali al di sotto (o al di sopra) di una threshold di energia.

3. Contatore proporzionale a scintillatore liquido: esso basa il suo funzionamento sulle proprietà di determinate sostanze organiche (solitamente C_6H_6) contenute in alcuni scintillatori di emettere luce (detto evento fluorescente) quando colpiti da una radiazione ionizzante. Questi sistemi, più precisi nel distinguere i segnali voluti da quelli di fondo, portano con sé un grande vantaggio: sono mediamente più piccoli dei sistemi precedenti e di conseguenza sono meno soggetti a rumore di fondo a parità di efficienza di misura.
4. Acceleratore con spettrografo di massa (AMS): esso sfrutta l'accoppiamento di uno spettrografo di massa e un acceleratore di particelle per andare a misurare direttamente la quantità di ^{14}C e successivamente il rapporto isotopico dato da $\frac{N(^{14}C,t)}{N(^{12}C,t)}$. il vantaggio di associare un acceleratore ad uno spettrografo è che la risoluzione è ampiamente superiore rispetto all'utilizzo dello spettrografo da solo. La necessità di un'alta risoluzione deriva dalla ampia differenza di popolazioni tra ^{12}C e ^{14}C e dal fatto che per reperti molto antichi il ^{14}C è presente in piccole quantità. Misurare direttamente il numero di ^{14}C presenti nel reperto piuttosto che l'attività riduce di molto l'errore statistico associato alla misura.

4.2.1 Gestione della radiazione di fondo

Come nella maggior parte delle misurazioni anche in questo caso dobbiamo tenere conto della possibilità di andare a misurare della radiazione che non proviene dal reperto preso in esame sotto forma di *radiazione di fondo* o *rumore*. Per ovviare a questo problema possiamo adottare diverse precauzioni quali:

- Utilizzare strumenti costruiti con materiali privi di sostanze potenzialmente radioattive
- Proteggere con involucri radioassorbenti passivi(es. Pb per raggi γ e X e/o paraffina borata) la zona contenente il contatore
- Proteggere con involucri radioassorbenti attivi di compensazione(es. scintillatori accoppiati a fotomoltiplicatori che, misurando l'incidenza di particelle veloci come i muoni, permettono di cancellare in presa dati il fondo creato da questi ultimi)

4.3 Preparazione dei reperti per la misura

I reperti da sottoporre a datazione al ^{14}C devono essere preparati adeguatamente prima di essere sottoposti all'analisi. Ovviamente non tutti i tipi di reperti passano attraverso gli stessi processi ma possiamo delineare una procedura standard applicabile, entro certi limiti, alla maggior parte dei reperti. In genere viene prelevata una piccola quantità del reperto da sottoporre all'analisi (che d'ora in poi indicheremo come "campione"). Anche in questo passaggio stiamo assumendo la omogeneità storica del campione. non sempre soddisfatta.

I passaggi che il campione attraversa sono solitamente i seguenti:

1. Per prima cosa i campioni vengono purificati chimicamente e fisicamente da tutti i materiali contaminanti estranei.
2. Dopodiché il campione (o una sua parte se esso è sufficientemente grande) viene bruciato completamente per ottenere da esso la CO_2 disponibile come risultato della combustione.
3. La CO_2 così ottenuta viene poi trattata per trasformarla in altri composti carbonati (es grafite o gas a base carbonica)
4. Il prodotto finale verrà quindi utilizzato come materiale da sottoporre a radiodatazione.

4.4 Efficienza delle tecniche di misura

Generalmente l'efficienza di un sistema è definita da due parametri: l'età massima misurabile e il margine di errore. Tra i sistemi precedentemente elencati il migliore per quanto riguarda entrambi i parametri è il AMS senza contare il fatto che richiedere frammenti di reperti molto più piccoli degli altri metodi.

Tali parametri sono valutabili come segue:

- *Fattore di merito*: ottenuto come $F = \frac{N}{\sqrt{B}}$ con N numero di conteggi di decadimento del ^{14}C e \sqrt{B} l'errore statistico sui conteggi stessi. Questo fattore aumenta con la massa del campione e con l'età.
- Età massima misurabile: dipendente dai limiti costruttivi del sistema con un massimo di affidabilità statistica raggiunto attorno ai 60000/70000 anni
- Precisione massima: data dal confronto tra l'errore statistico sul conteggio di ^{14}C valutato su un campione moderno e il valore ottenuto durante la misura. Fattore che ha raggiunto il suo massimo attorno allo 0.2% (che corrisponde a circa 16 anni di incertezza)

I principali ostacoli quando si vuole ottenere un'alta efficienza sono dati dalle impurità nel campione (errore sistematico) e dalla radiazione di fondo che nonostante gli accorgimenti utilizzabili non sono mai eliminabili del tutto. Nel caso di una misurazione AMS solitamente tali errori provengono dai gas atmosferici che, inevitabilmente, attraversano le pareti dei dispositivi di misura.

Le età ottenute dal metodo AMS vengono definite "età apparenti" poiché a queste misure vanno applicate ulteriori condizioni come la calibrazione e lo studio degli errori statistici.

4.5 Affidabilità della misura

In questa sezione ci occuperemo della valutazione della coerenza di misura misure ripetute e della compatibilità dei risultati ottenuti.

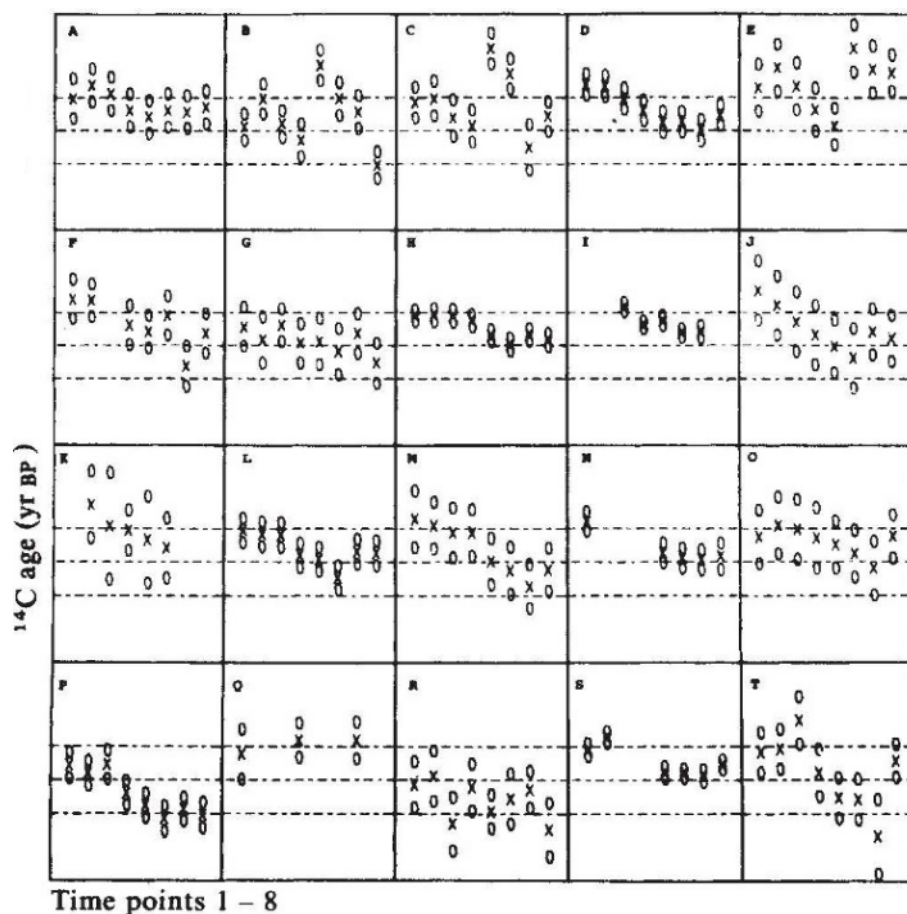


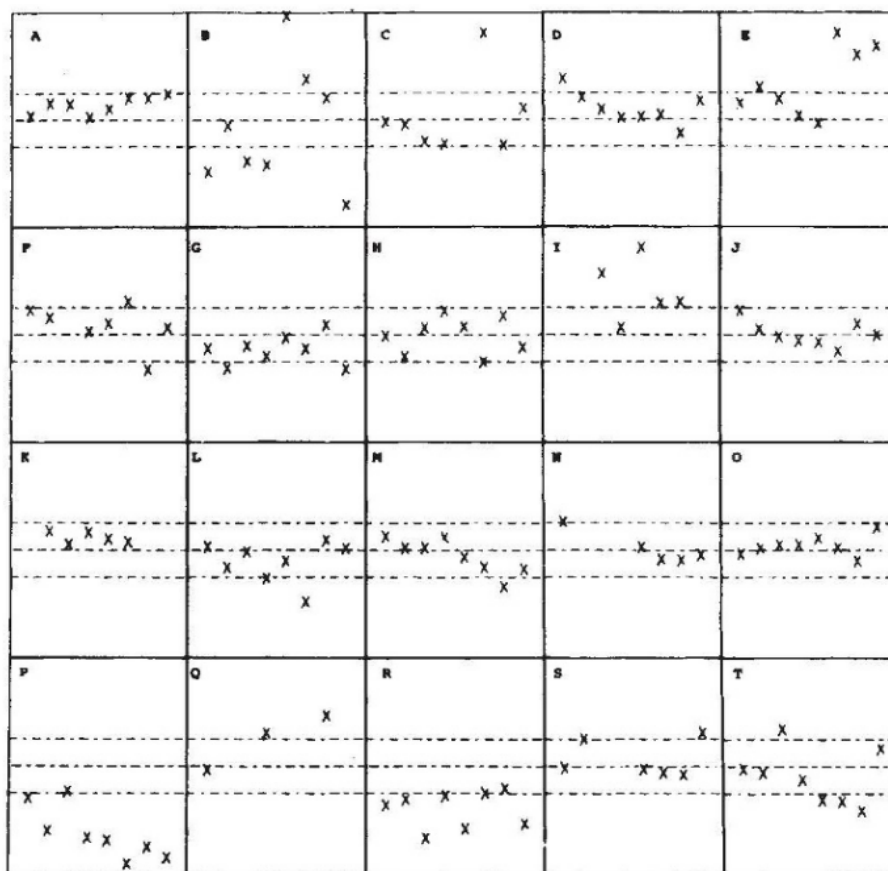
Figura 6: Datazioni con radiocarbonio, con stime di errore di 2σ svolte in diversi laboratori con linee di riferimento a 5200, 5000 e 4800 anni.⁶

Di seguito mostriamo i risultati ottenuti da misure ripetute da diversi enti sullo stesso campione (datato a circa 5000 anni):

Il grafico mostra il discostamento dal valore atteso di 5000 anni (in tratteggio con barre di errore corrispondenti a ± 200 anni) nei diversi laboratori (indicati dalle diverse lettere).

Da queste diverse misure si ottiene poi il *residuo standard* corrispondente al rapporto tra la differenza tra la misura di un laboratorio e la media su vari laboratori e la deviazione standard. Se gli errori stimati fossero corretti, questi valori dovrebbero cadere entro un intervallo di $\pm 2\sigma$.^[1]

⁶Giorgio Bendiscioli, Alberto Panzarasa. *La datazione con il radiocarbonio*, La goliardica pavese.



Time points 1 – 8

Figura 7: Valutazione dei residui standard su otto campioni differenti ⁷

Osservando i risultati si può notare che in diversi casi questa condizione non è soddisfatta, fattore che indica possibili errori sistematici o sottostima di errori. Una delle strategie per limitare questa possibile discordanza tra le misure è condividere tra tutti i laboratori che analizzeranno un dato campione una procedura dettagliata da seguire in modo sempre identico in modo da limitare (o almeno rendere comuni a tutte le misure) gli errori sistematici.

⁷Giorgio Bendiscioli, Alberto Panzarasa. *La datazione con il radiocarbonio*, La goliardica pavese.

4.6 Il problema della calibrazione

Uno dei punti più critici della radiodatazione al ^{14}C è la calibrazione e conseguente affidabilità intrinseca (intendendo dopo la applicazioni di tutte le precauzioni e correzioni precedentemente discusse). Le datazioni al radiocarbonio tendono a discostarsi dall'età reale dei reperti (senza applicare modifiche di calibrazione) a causa principalmente della variazione della concentrazione di ^{14}C in atmosfera. In Fig. è possibile osservare il confronto tra la datazione di un insieme di età note di campioni e la loro età misurata tramite radiocarbonio:

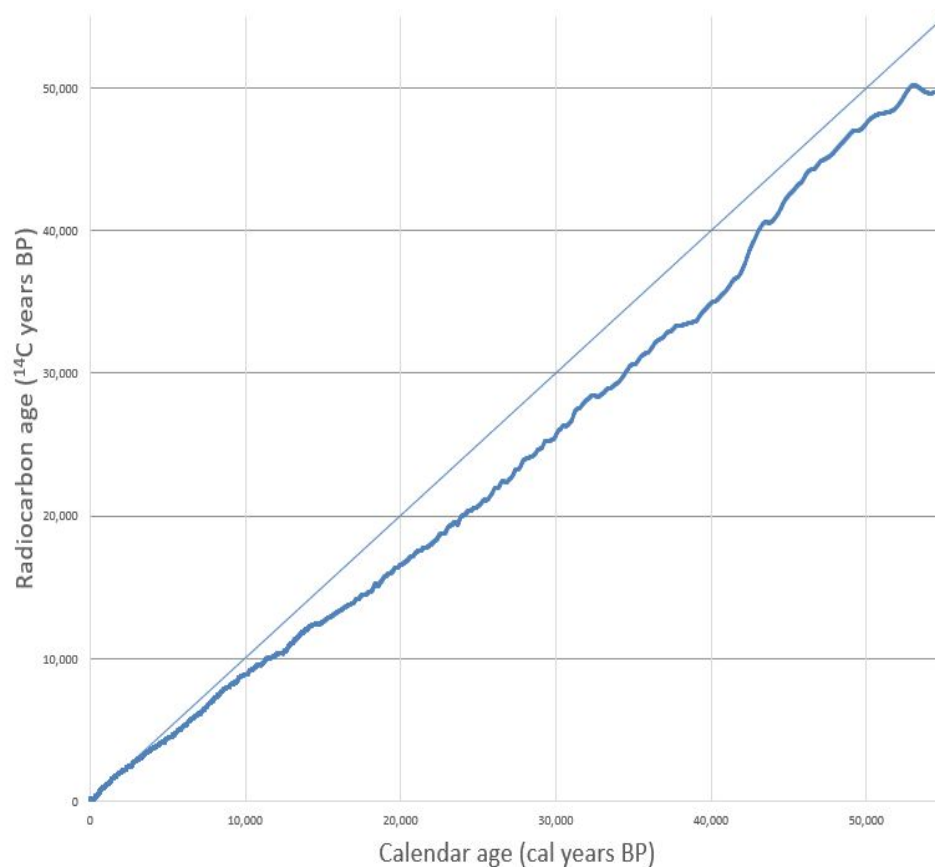


Figura 8: Confronto tra età reali e età misurate tramite analisi al radiocarbonio⁸

⁸Heaton Timothy J, Blaauw Maarten, Blackwell Paul G., Ramsey Christopher Bronk, Reimer Paula J., Scott E. Marian (August 2020). "The *IntCal20* approach to radiocarbon calibration curve construction: a new methodology using Bayesian splines and errors-in-variables"

Per andare a compensare queste deviazioni intrinseche dalle età corrette possiamo utilizzare diverse tecniche a cui fare riferimento per calibrare il nostro sistema di misura:

1. La dendrocronologia
2. Il metodo Uranio-Torio
3. la cronologia delle varve
4. La termoluminescenza

4.6.1 La dendrocronologia

Questa tecnica di calibrazione si basa sul confronto tra le date dedotte del ^{14}C contenuto negli anelli di accrescimento degli alberi e la loro effettiva età deducibile dalla posizione degli anelli. Da queste analisi possiamo andare a dedurre l'andamento della concentrazione del ^{14}C negli anni così da poter capire le correzioni da applicare sulle le misure al ^{14}C svolte su reperti risalenti al periodo preso in esame.

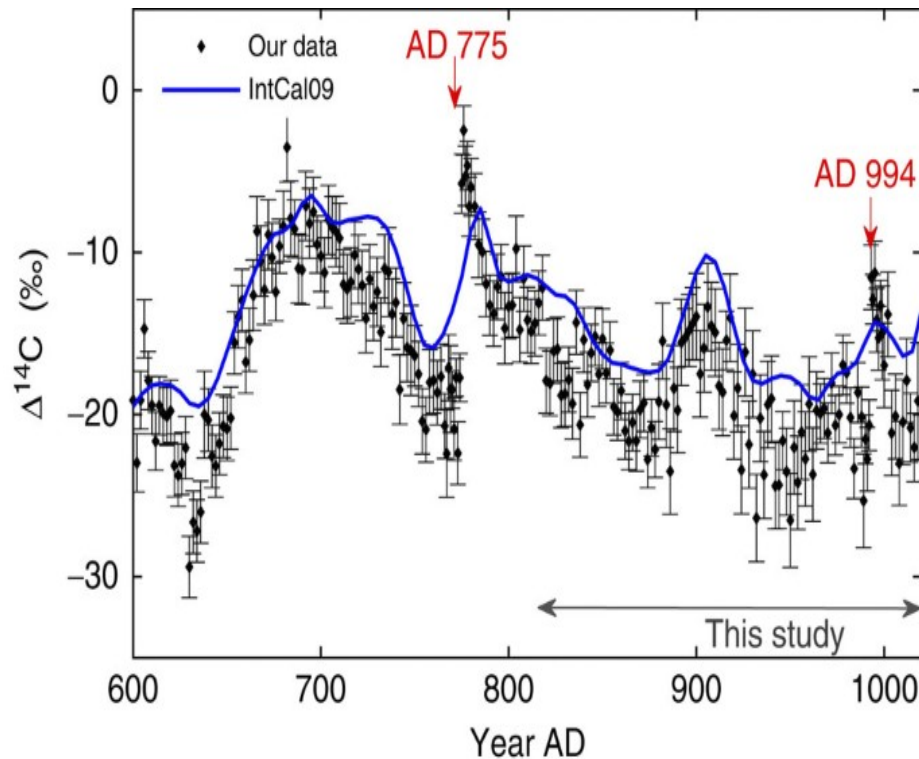


Figura 9: Confronto tra età reali ottenute da misure precedenti o da certificati e età misurate tramite analisi al radiocarbonio ⁹

4.6.2 Il metodo Uranio-Torio

Con il metodo Uranio-Torio si intende un metodo di radiodatazione basato sulla misura di tale isotopo e dell' ^{238}U (e dei suoi discendenti) all'interno dei coralli. La presenza del ^{238}U è completamente indipendente dai fattori che potrebbero eventualmente andare a influire sull'abbondanza del ^{14}C infatti questo tipo di calibrazione estende la validità delle misure al ^{14}C esaminate fino 12000 anni e ne diminuiscono l'errore fino ad un 2σ corrispondente a ± 200 anni^[1]

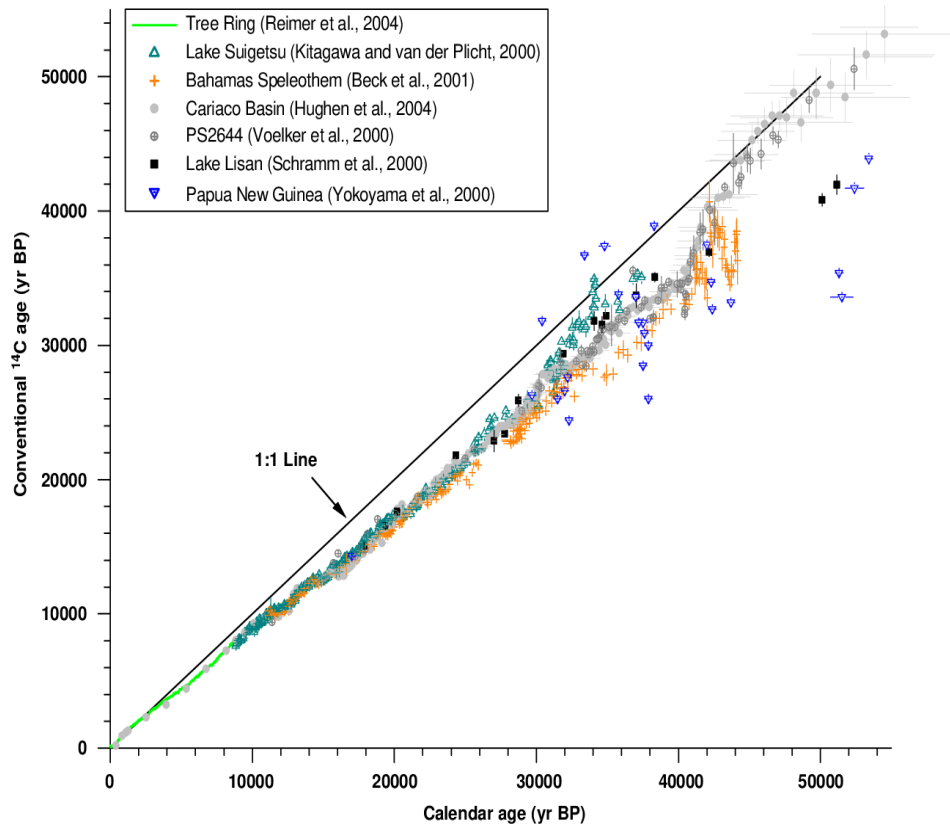


Figura 10: Confronto tra età reali e età misurate tramite calibrazioni con dendrocronologia e Uranio-Torio ¹⁰

⁹<https://www.nature.com/articles/ncomms2783>

¹⁰R. Fairbanks, R. Mortlock, T. Chiu, Li Cao, A. Kaplan, T. Guilderson, Todd W. Fairbanks, A. Bloom, P. Grootes, M. Nadeau "Radiocarbon calibration curve spanning 0 to 50,000 years BP based on paired $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ and ^{14}C dates on pristine corals"

4.6.3 La cronologia delle varve

Con varve si intendono gli strati (solitamente annuali) distinguibili all'interno di formazioni rocciose di natura sedimentaria in cui i materiali organici (quindi portatori di ^{14}C) vengono intrappolati. Conoscendo quindi l'età dello strato sedimentario e andando successivamente a misurare presenza e attività del ^{14}C possiamo definire un sistema di calibrazione naturale con una portata di 45000 anni. Dobbiamo però considerare che nel caso di varve sotterranee la misura è modificata anche dal ^{14}C derivante dalla materia biologica sedimentata nel tempo che alza la concentrazione del ^{14}C geologico.

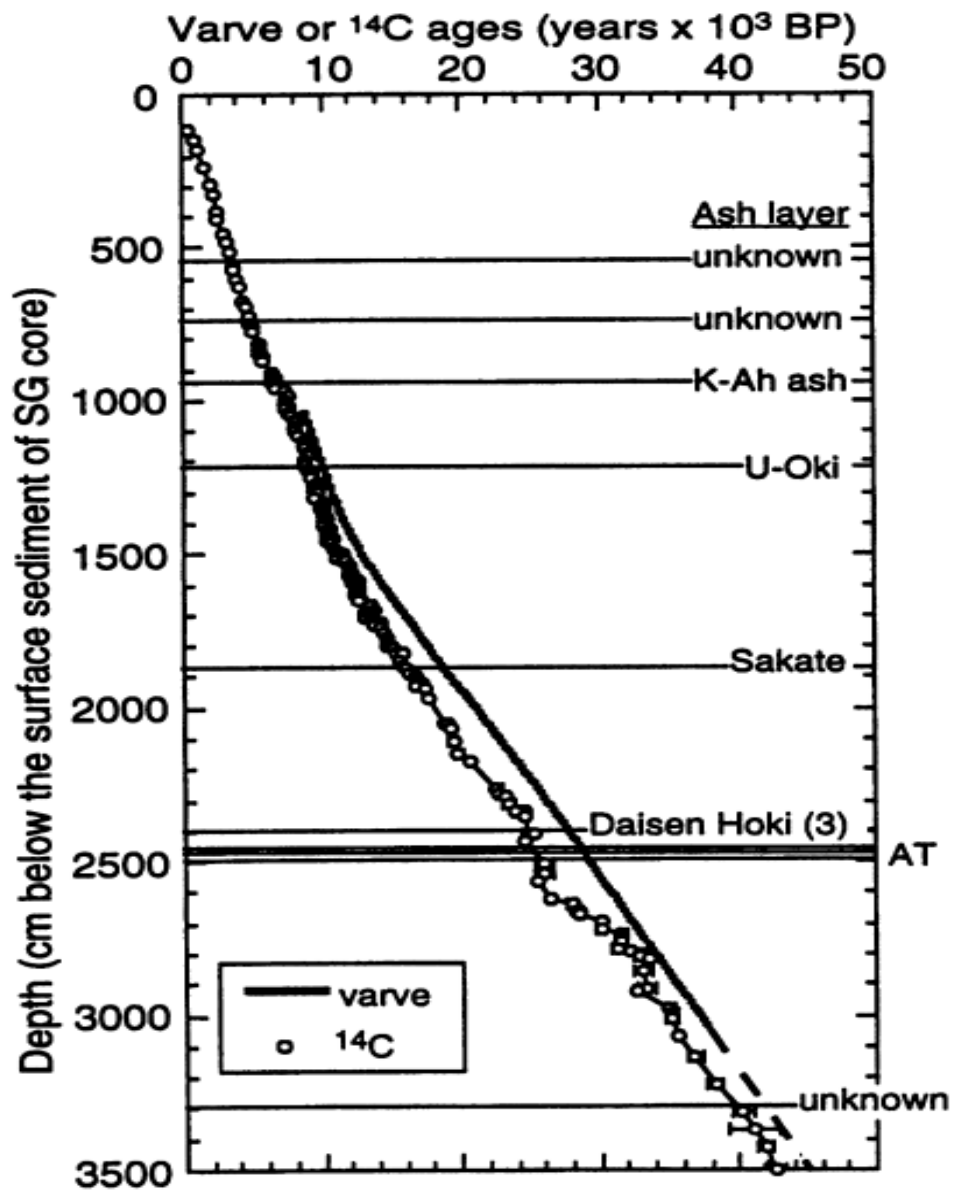


Figura 11: Confronto tra l'età delle varve e del radiocarbonio contenuto in esse in funzione della profondità al di sotto del Lago Suigetsu ¹¹

¹¹Hiroyuki Kitagawa. Johannes Van Der Plicht. *A 40,000-Year Varve Chronology from Lake Suigetsu, Japan: Extension of the ^{14}C Calibration Curve*

5 La termoluminescenza

5.1 Introduzione alla tecnica

Con termoluminescenza si indica una forma di luminescenza che viene manifestata da alcuni materiali cristallini quando l'energia precedentemente assorbita sotto forma di radiazione elettromagnetica o da altre radiazioni ionizzanti viene riemessa come luce a seguito di una variazione di temperatura del materiale. Dal punto di vista fisico accade che la radiazione incidente induce una transizione a degli stati elettronici eccitati nei materiali cristallini. In determinati materiali, questi stati possono avere tempi di vita molto lunghi a causa di difetti localizzati, o imperfezioni (ioni di impurità, dislocazioni da stress e altri fenomeni che disturbano la regolarità del campo elettrico che tiene insieme gli atomi nel reticolo cristallino), del reticolo cristallino che interrompono le naturali interazioni intermolecolari o interatomiche nel reticolo cristallino che riporterebbero alla condizione iniziale non eccitata. Dal punto di vista quantistico-meccanico, accade che opportune stimolazioni possono andare a variare le popolazioni statistiche di stati stazionari che non hanno alcuna dipendenza formale dal tempo; tuttavia, non sono energeticamente stabili. Il riscaldamento del materiale consente agli stati intrappolati di interagire con i fononi, cioè i quanti di vibrazioni di reticolo, per decadere rapidamente in stati di energia inferiore, provocando l'emissione di fotoni nel processo.

La tecnica ha un'ampia applicazione nonostante sia necessaria la distruzione di una quantità relativamente ridotta di materiale campione. Questo perché è necessario portare il pezzo esaminato ad una temperatura di oltre i 500 °C.

Per ricavare una effettiva datazione di un reperto occorre valutare il tasso di dose accumulata nel tempo. Poiché la popolazione degli elettroni intrappolati aumenta con dall'irraggiamento subito nel tempo. Questa grandezza viene poi messa in relazione con un campione di controllo (o di calibrazione) comunemente ottenuto misurando la radioattività alfa (uranio/torio) e il contenuto di potassio (^{40}K) del materiale di controllo per poi valutare le fluttuazioni rispetto al reperto.

5.2 Datazione tramite termoluminescenza

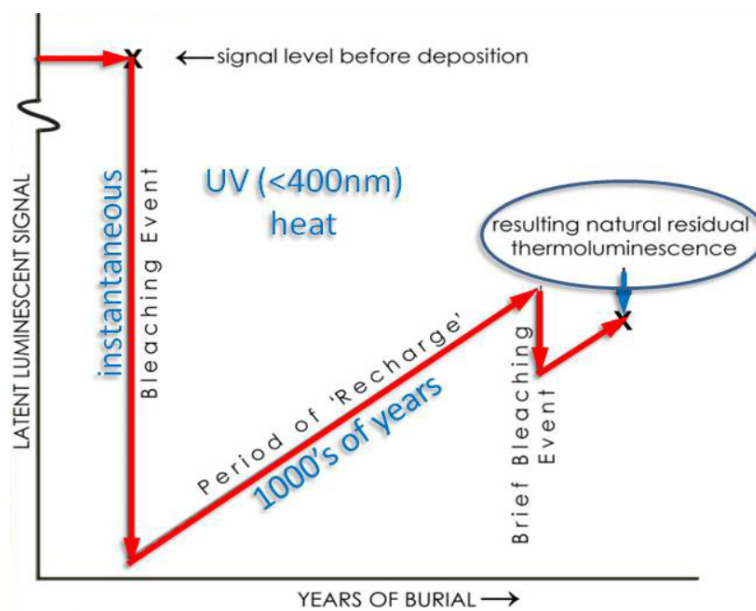


Figura 12: Andamento della luminosità latente nel tempo all'interno di un materiale preso in esame¹²

In Figura 12 vengono mostrate le varie fasi che attraversa un campione adatto alle analisi tramite termoluminescenza:

1. Un primo evento (detto "bleaching event") in cui la luminescenza latente viene azzerata che corrisponde ad una prima cottura del campione (come nel caso della creazione di un vaso) che libera tutti gli elettroni dalle trappole elettroniche
2. Una fase di accumulo (solitamente dell'ordine di migliaia di anni) in cui le diverse possibili fonti radioattive che entrano in contatto con il campione fanno sì che la popolazione di elettroni nelle trappole elettroniche aumenti tramite somministrazione di energia.
3. Un secondo evento (detto "brief bleaching event") in cui la luminescenza latente subisce un'importante diminuzione che corrisponde alla misura sperimentale (quindi una seconda cottura) siccome è necessario liberare grandi quantità di elettroni dalle rispettive trappole per eseguire l'analisi tramite termoluminescenza.

¹²Aitken, M.J. *Thermoluminescence Dating* Academic Press, London

4. Una seconda fase di accumulo, appena successiva al "brief bleaching event", in cui il campione riprende a assimilare energia da fonti radioattive esterne aumentando nuovamente la popolazione statistica di elettroni intrappolati

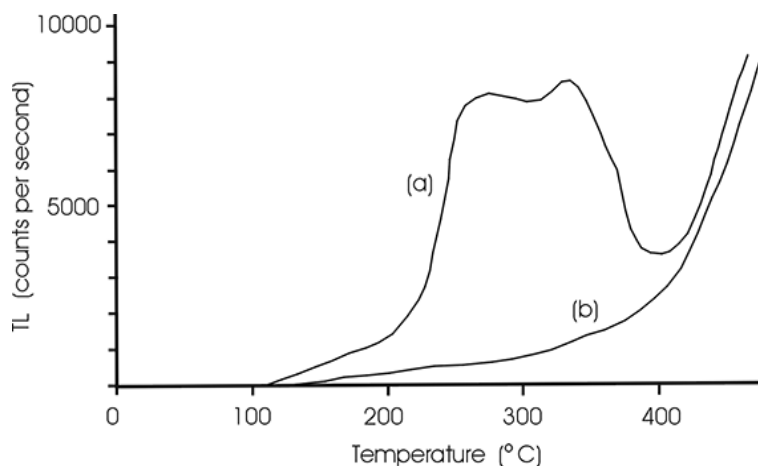


Figura 13: Esempio di andamento di conteggi di eventi termoluminescenti in funzione della temperatura del campione ¹³

In figura 13 vediamo invece un confronto tra curve di luminescenza ottenute in seguito a stimolazione termica. La curva (a) mostra l'emissione di luce osservata durante il primo riscaldamento di un campione generico. La curva (b) è invece dovuta ad un secondo riscaldamento del medesimo campione. In particolare la curva (b) è data dall'incandescenza che avviene normalmente al riscaldamento di qualsiasi corpo.

La datazione a termoluminescenza (TL) si basa sulla valutazione, mediante la misura della dose di radiazione accumulata, del tempo trascorso da quando il materiale contenente minerali cristallini è stato riscaldato. Quando un materiale cristallino viene riscaldato durante le misurazioni, inizia il processo di termoluminescenza andando ad emettere un segnale luminoso proporzionale alla dose di radiazione assorbita dal materiale.

¹³Ken Munyikwa. *Luminescence Dating: Applications in Earth Sciences and Archaeology*

5.3 Termoluminescenza spuria

La termoluminescenza spuria è un' emissione di luce che non è causata dalla radiazione e può sovrapporsi al segnale di Termoluminescenza del campione, causando una sovrastima della misura e, di conseguenza, dell'età. La TL spuria può avere molteplici cause, come la carica trasferita dalle trappole profonde a quelle superficiali o la tribotermoluminescenza (dovuta a effetti di riscaldamento a seguito di interazioni di attrito interne alla struttura). La chemiluminescenza ossia l'emissione di radiazione che può accompagnare una reazione chimica inattesa)

Se non è possibile individuare o eliminare le emissioni spurie, la datazione corretta del campione non può essere effettuata. poiché queste interferenze possono portare a misure con errori totali sulla singola misura superiori al 20% rispetto al valore corretto

5.4 Apparato sperimentale di misura

Siccome gli effetti termoluminescenti di interesse scientifico sono spesso molto deboli occorre avere un impianto adatto alla loro amplificazione e successiva misura. A questo scopo vediamo in breve quali sono gli elementi necessari in un impianto sperimentale di misura di termoluminescenza e quali sono i loro ruoli:

- Una struttura di contenimento per il campione dotata di una piastra riscaldante
- Una fonte di fotoni per la stimolazione ottica del reticolo cristallino del campione
- Un fotomoltiplicatore per aumentare l'intensità del segnale emesso dal campione
- Un sistema di misurazione, collegato alle diverse componenti dell'impianto, in grado di registrare (e successivamente immagazzinare) in tempo reale le variazioni di temperatura e i fotoni emessi alla fine della fase di fotomoltiplicazione.

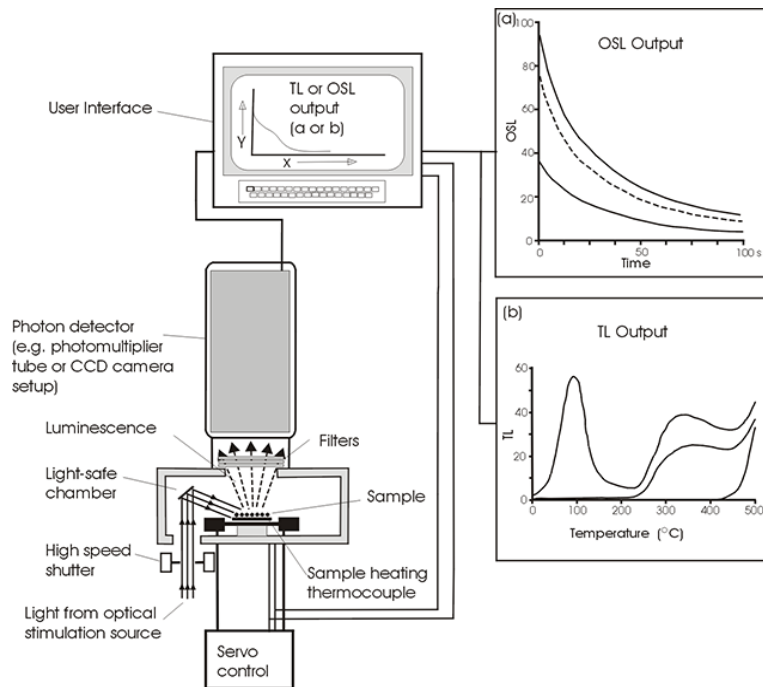


Figura 15: Esempio di struttura e funzionalità di un apparato di misura tramite termoluminescenza con dati in output la lettura tramite termoluminescenza (TL) e tramite luminescenza ottica stimolata (OSL) una tecnica in cui si misura l'intensità della luce emessa dal campione sotto stimolazione tramite radiazione visibile (solitamente blu o verde). Durante la misura viene registrata la curva di emissione di luminescenza in funzione del tempo. I segnali misurati tramite TL sono spesso affiancati ad un secondo metodo di misura per avere un confronto diretto e immediato.¹⁵

6 Tecniche di radiodatazione al confronto: il caso delle ceramiche di Gasya

Uno esempio più recenti in cui sono state utilizzate, e messe a confronto, la radiodatazione al ^{14}C e la radiodatazione tramite termoluminescenza è il caso delle ceramiche venute alla luce e analizzate durante gli scavi archeologici nelle zone limitrofe a Gasya (bacino meridionale del fiume Amur, Russia) in cui è stato possibile far risalire alcuni frammenti di ceramica, appartenenti a gruppi Neolitici di individui appartenenti al gruppo paleoculturale degli Osipovka, ad oltre i 10000 anni fa

Tali misure sono state di particolare utilità dal punto di vista archeologico in quanto hanno permesso di stabilire la coerenza temporale e archeologica di diversi siti di insediamenti umani paleolitici mentre, dal punto di vista scientifico è possibile mettere a confronto l'accuratezza di misura delle due tecniche su uno stesso gruppo di reperti. In questo caso particolare sono stati confrontate le misure ottenute sulle ceramiche tramite termoluminescenza e sulla torba lasciata dai focolari tramite ^{14}C .

È importante soffermarsi sul fatto che il sito di estrazione dei reperti era stato già datato, tramite la datazione al ^{14}C di cumuli di legna carbonizzata appartenenti alla stessa zona archeologica delle ceramiche, ad un periodo compreso tra $10,875 \pm 90$ e $12,960 \pm 120$ anni fa.

6.1 Metodologia di misura tramite ^{14}C

Per quanto riguarda le misurazioni svolte tramite ^{14}C i frammenti dei contenitori, dopo essere stati separati in parti interne ed esterne dei contenitori (siccome il carbonio più antico risiede nelle parti più esterne dei recipienti) sono stati analizzati tramite cotture, a vuoto, a differenti temperature e tempi: 400°C per 1 ora; 800°C per 30 minuti e infine 1000°C per 10 minuti.

6.2 Metodologia di misura tramite termoluminescenza

Per quanto riguarda le misurazioni svolte tramite termoluminescenza sono stati ricavati 3 frammenti e, dopo un trattamento di pre-cottura a 150° per 100 secondi, posti in un sistema di misura che sfrutta la valutazione della dose β additiva tramite una sorgente $\text{Sr}^{90}\text{-Y}^{90}$.

Tramite il metodo della dose additiva si può risalire alla dose β assorbita dal campione durante la sua fase di giacenza.

¹⁵Yaroslav V. Kuzmin, Sara Hall, Michael S. Tite, Richard Bailey, Jeanette M. O'Malley, Vitaly E. Medvedev *Radiocarbon and thermoluminescence dating of the pottery from the early Neolithic site of Gasya (Russian Far East): initial results*

6.3 Confronto tra risultati tramite ^{14}C e termoluminescenza

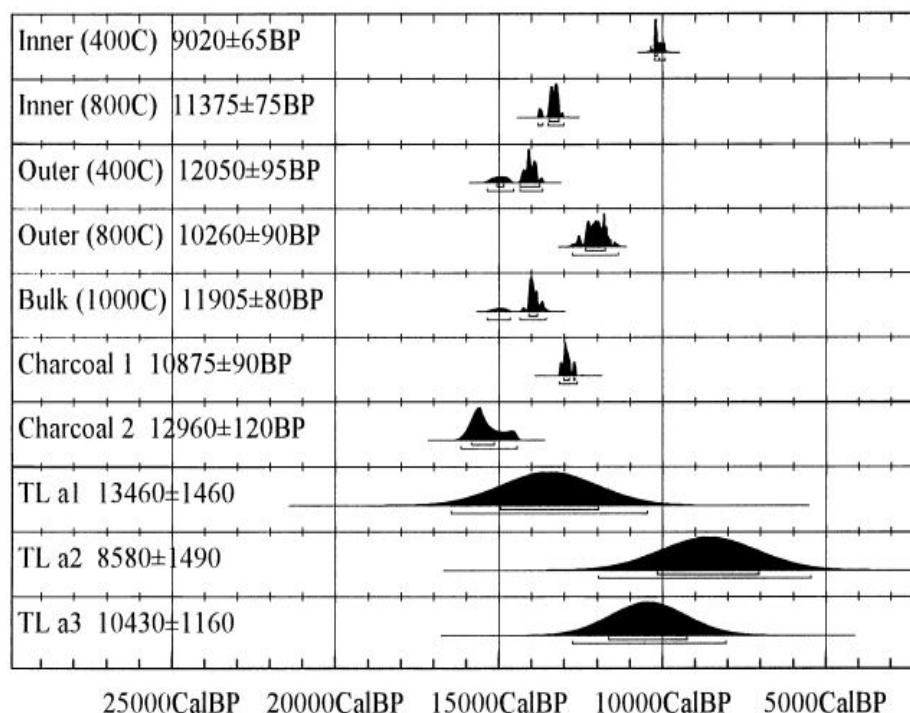


Figura 16: Confronto tra datazioni ottenuti tramite ^{14}C del carbone contenuto nelle ceramiche e misure tramite termoluminescenza rispetto a date di calibrazione ottenute in precedenza dal sito archeologico ¹⁶

Alla luce dei risultati sperimentali ottenuti, che come vediamo variano in ventagli di ampiezza non trascurabili, dobbiamo valutare quali misure prendere come riferimento alle quali associare una data definitiva.

Per le date ottenute dal ^{14}C scegliamo le misure svolte sugli strati interni, siccome essi trattengono una maggiore quantità di carbone antico, cotti a 400°C da cui possiamo fissare una data di riferimento a 9020 anni fa.

Per quanto riguarda le misure effettuate tramite termoluminescenza, vediamo che, in aggiunta alle grandi barre di errore, i risultati ottenuti sono distribuiti su un intervallo che supera i 5000 anni.

Quindi dobbiamo sfruttare le misure svolte tramite ^{14}C andando a prendere in considerazione i periodi corrispondenti con delle sovrapposizioni di date tra le due tecniche di misura, quindi otterremo un risultato di 9000±1500 anni

¹⁶Yaroslav V. Kuzmin, Sara Hall, Michael S. Tite, Richard Bailey, Jeanette M. O'Malley, Vitaly E. Medvedev *Radiocarbon and thermoluminescence dating of the pottery from the early Neolithic site of Gasya (Russian Far East): initial results*

fa. Queste analisi hanno mostrato che le età ottenute tramite ^{14}C relative alla ceramica dalla regione di Gasya corrispondono ai risultati della datazione tramite luminescenza (della stessa ceramica), dimostrando la loro affidabilità. Ciò suggerisce che la ceramica nel primo periodo della storia dell'Estremo Oriente russo è una fonte storica affidabile in quanto le date ottenute tramite ^{14}C sono coerenti con quelle ottenute tramite altre tecniche di datazione. Inoltre, le date ottenute dimostrano che l'Estremo Oriente russo potrebbe rappresentare un centro indipendente di origine della ceramica all'interno dell'Asia orientale implicando, alla luce delle date ottenute, che queste ceramiche neolitiche sono tra le più antiche al mondo.

Tuttavia, le attuali date sono troppo imprecise per stabilire se la ceramica dell'Estremo Oriente russo abbia la priorità su altre ceramiche scoperte in altre zone con datazioni antecedenti. Sono quindi necessarie ulteriori ricerche per ottenere date più precise tramite il ^{14}C e termoluminescenza, eventualmente tramite comparazione con altre tecniche di radiodatazione.

7 Tecniche di radiodatazione al confronto: il caso della cattedrale di San Lorenzo

Un altro caso di interesse per valutare l'affidabilità e la compatibilità delle datazioni al ^{14}C e quelle svolte tramite termoluminescenza è quello della cattedrale di San Lorenzo a Cuneo in cui durante diversi scavi archeologici, legati a diverse opere di costruzione svolte sulla struttura, sono stati identificati tipi di mattoni molto diversi tra loro, risalenti a differenti periodi. In particolare sono stati identificati 3 settori della struttura con elementi costruttivi risalenti a diversi secoli. La struttura facente parte delle fondamenta dell'edificio antico presenta elementi risalenti al sesto secolo mentre in due distinte zone in superficie sono stati isolati mattoni e altre parti di edificio risalenti al decimo secolo e al dodicesimo secolo separatamente.

Alla luce di queste notevoli discrepanze tra date non è possibile attribuire con certezza un periodo di costruzione dell'edificio con certezza, per tale motivo sono state svolte misure di radiodatazione sui diversi siti di scavi col fine di provare (o confutare) le date teorizzate dagli archeologi basate sulle differenti tecniche costruttive.

7.1 Metodologie e tecniche utilizzate per la datazione al ^{14}C

In base ai materiali di cui erano composti i diversi elementi costruttivi presenti sono state scelte la datazione tramite radiocarbonio per datare la calce presente nel fonte battesimale mentre la datazione tramite termoluminescenza è stata utilizzata per datare mattoni e tubi.

Per la datazione al ^{14}C , dai campioni sono stati prelevati grumi di calce pura dalla malta utilizzata nelle diverse parti del fonte battesimale e datata con la tecnica "Pure lime lumps" che sfrutta la purezza del campione (e la pressoché assenza di grumi) per ridurre drasticamente gli errori nella datazione del ^{14}C . Inoltre la presenza di carbonio nella calce è risultata ragionevole rispetto alla concentrazione atmosferica di ^{14}C teorizzata al momento dell'indurimento attribuendo maggiore affidabilità al campione.

Per le misure al ^{14}C sono stati prelevati campioni da 5 siti e sottoposti alla procedura standard di preparazione utilizzata per i carbonati ovvero una separazione meccanica delle diverse componenti sotto microscopio ottico al fine di rimuovere gli agenti macrocontaminanti depositati in superficie. I campioni, dopo una breve cottura preliminare, sono poi stati pressati in portabersagli adatti alla spettrometria di massa per le misure dei rapporti isotopici del carbonio.¹⁷

¹⁷Come standard sono stati utilizzati uno standard di saccarosio C6 dell'Agenzia internazionale per l'energia atomica (IAEA) con una concentrazione nominale di ^{14}C di 150,61 pMC e marmo di Carrara C1 con un contenuto nominale di ^{14}C di 0 pMC¹⁸.

¹⁸Giovanni L. Pesce¹, Egle Micheletto, Gianluca Quarta, Sofia Uggè, Lucio Calcagnile, Anna Decri *RADIOCARBON DATING OF MORTARS FROM THE BAPTISMAL FONT OF*

7.2 Metodologie e tecniche utilizzate per la datazione tramite termoluminescenza

Per quanto riguarda l'analisi tramite termoluminescenza sono stati prelevati campioni di ceramica di diversa natura provenienti da 3 siti: dai mattoni alla base del fonte battesimale, dalle tubature facenti parte del sistema di drenaggio del fonte battesimale e dai mattoni delle pareti della struttura della chiesa.

Tali campioni, una volta portati nel centro di analisi tramite termoluminescenza dell'università Bicocca di Milano, sono stati sottoposti a misure con tecnica a grana-fine.

La valutazione della dose annua è stata effettuata utilizzando misurazioni dell'attività α totale (utilizzando anche il confronto con U e Th) in un rivelatore fotometrico a fiamma posto sui campioni in ceramica. Il contributo della dose ambientale è stato misurato con la camera di ionizzazione per il dosimetro ambientale.

7.3 Risultati tramite datazione al ^{14}C

Le datazioni ottenute tramite radiocarbonio, riportate in Fig.18, mostrano che tali date calibrate sono coerenti tra loro e ricadono in un intervallo compreso tra il 690 e il 1020 d.C.

La coerenza dei risultati implica inoltre che sia altamente improbabile qualsivoglia tipo di alterazione delle misure legate alla carbonatazione atmosferica nel tempo o legate all'eccessivo scioglimento dei carbonati causato dall'umidità delle stanze vicine alla fonte. Se uno di questi fattori si fosse verificato, la probabilità che le datazioni dei campioni fossero così simile sarebbe stata estremamente bassa.

THE SAN LORENZO CATHEDRAL OF ALBA (CUNEO, ITALY): COMPARISON WITH THERMOLUMINESCENCE DATING OF RELATED BRICKS AND PIPES

Specimen	Weight (mg)	CEDAD code	Uncalibrated ages (BP)	Calibrated ages (cal AD)
C2f	33	LTL8445A	1121 ± 45	780–790 800–1020
C3a	109	LTL8287A	1142 ± 40	770–990
C4	86	LTL8288A	1188 ± 50	760–980 690–750
C5	31	LTL8289A	1141 ± 40	770–990

Figura 17: ¹⁹

7.4 Risultati tramite termoluminescenza e conclusioni

I risultati della datazione, riportati in Fig.18, mostrano come i campioni 7, 8, 9, 10, e 11 sono contemporanei e databili al sesto secolo d.C. Mentre per quanto riguarda, altri reperti presentano datazioni ben diverse: il campione 13 presenta una datazione risalente al undicesimo secolo d.C. e i campioni 22-24 presenta datazioni risalenti ad un periodo compreso tra la seconda metà del ottavo secolo d.C. e la prima metà del IX secolo d.C.

Le date ottenute tramite termoluminescenza dei campioni 7, 8, 9, 10 e 11 differiscono dalle date al ¹⁴C ottenute dai campioni di calce; quindi, è probabile che le tubature e i mattoni siano più antichi della malta di calce che li lega e probabilmente potrebbero esserlo se fossero stati riutilizzati nelle differenti fasi di costruzione e modifica della struttura nei secoli.

Vedendo le date ottenute sembra presentarsi un salto temporale di circa 2 secoli nei processi di carbonatazione; dato altamente improbabile se non tramite alterazione artificiale. Ulteriore elemento che avvalorla la tesi del riutilizzo dei materiali ceramici costruttivi elementi in strutture precedenti. Infatti sappiamo che il riutilizzo di mattoni di strutture precedenti era una pratica molto comune nei secoli scorsi, come già testimoniato all'interno della cattedrale stessa e in molti altri luoghi del Nord Italia.

Un'ultima conferma di questa ipotesi è data dalla datazione tramite termoluminescenza dei mattoni utilizzati nella parete esterna del campanile (campioni 13,

¹⁹Giovanni L Pesce¹, Egle Micheletto, Gianluca Quarta, Sofia Uggè, Lucio Calcagnile, Anna Decri *RADIOCARBON DATING OF MORTARS FROM THE BAPTISMAL FONT OF THE SAN LORENZO CATHEDRAL OF ALBA (CUNEO, ITALY): COMPARISON WITH THERMOLUMINESCENCE DATING OF RELATED BRICKS AND PIPES*

22, 23 e 24) Questi mattoni, infatti, sono stati datati ad un'epoca molto simile a quella relativa alla calce, e le loro dimensioni concordano con la dimensione del modello di mattone tipico medievale.

Tenendo in considerazione i risultati ottenuti dalle 2 datazioni possiamo affermare dunque che la coerenza tra i risultati della datazione al ^{14}C e i risultati ottenuti tramite le analisi mineralogiche della malta fanno pensare che il fonte battesimale della cattedrale fu costruita in un'unica fase costruttiva compresa tra il 770 d.C e il 990 d.C. mentre grazie ai risultati ottenuti tramite la termoluminescenza suggerisce che i materiali ceramici, presenti in mattoni e tubi, utilizzati il fonte battesimale siano stati prodotti tra il 500d.C. e il 650 d.C. Per questi motivi, tenendo in considerazione l'aspetto archeologico e storico della zona, è corretto ipotizzare che l'edificio principale sia stato costruito all'interno dell'intervallo di tempo misurato (770–990 d.C.), mentre il fonte battesimale è più probabile che sia stato costruito la fine del X secolo d.C.

Samples ^b	Location	Date (AD)	Average date (AD)
7	Drainage pipe	580 ± 80	590 ± 70
8	Drainage pipe	595 ± 100	
9	Foundation of the baptismal font	595 ± 65	575 ± 75
10	Foundation of the baptismal font	595 ± 65	
11	Foundation of the baptismal font	600 ± 100	
13	USM 993	1030 ± 60	1030 ± 60
22	Bell tower, external	810 ± 70	790 ± 55
23	Bell tower, external	790 ± 95	
24	Bell tower, external	825 ± 60	

Figura 18: ²⁰

²⁰Giovanni L Pesce¹, Egle Micheletto, Gianluca Quarta, Sofia Uggè, Lucio Calcagnile, Anna Decri *RADIOCARBON DATING OF MORTARS FROM THE BAPTISMAL FONT OF THE SAN LORENZO CATHEDRAL OF ALBA (CUNEO, ITALY): COMPARISON WITH THERMOLUMINESCENCE DATING OF RELATED BRICKS AND PIPES*

8 Bibliografia

- [1] Giorgio Bendiscioli, Alberto Panzarasa. *La datazione con il radiocarbonio*, La goliardica pavese.
- [2] Keizars, K. Zen; Forrest, Beth M.; Rink, W. Jack (2008). *"Natural Residual Thermoluminescence as a Method of Analysis of Sand Transport along the Coast of the St. Joseph Peninsula, Florida"*
- [3] Thermoluminescence (TL) dating Archived 2015-04-02 at the Wayback Machine, University of Wollongong, Australia; Daybreak Corporation. Oxford University Archived 2015-04-02 at the Wayback Machine; Oxford Authentication
- [4] V.J. Bortolot *"Thermoluminescence dating of art objects"*, Daybreak Corporation. Michel Brent *"The Limits of TL"*, Archaeology Magazine, Volume 54, Number 1, January/February 2001
- [5] Yaroslav V. Kuzmin, Sara Hall, Michael S. Tite, Richard Bailey, Jeanette M. O'Malley, Vitaly E. Medvedev *Radiocarbon and thermoluminescence dating of the pottery from the early Neolithic site of Gasya (Russian Far East): initial results*
- [6] Giovanni L Pesce¹, Egle Micheletto, Gianluca Quarta, Sofia Uggè, Lucio Calcagnile, Anna Decri *RADIOCARBON DATING OF MORTARS FROM THE BAPTISMAL FONT OF THE SAN LORENZO CATHEDRAL OF ALBA (CUNEO, ITALY): COMPARISON WITH THERMOLUMINESCENCE DATING OF RELATED BRICKS AND PIPES*