

Analisi termografica di beni artistici ed archeologici

F. Scudieri, F. Gauzzi, R. Montanari, F. Mercuri, R. Volterri

In questo lavoro viene presentata un'analisi strutturale di alcuni manufatti artistici ed archeologici realizzata studiando le modalità di diffusione del calore al loro interno. La tecnica impiegata è quella della termografia infrarossa che permette di raccogliere informazioni sulla geometria nascosta dei campioni in esame e sul loro stato di conservazione in modo non invasivo, cioè non distruttivo e senza alcun contatto meccanico con il campione. In particolare per la copia in bronzo della statua di Marco Aurelio collocata in piazza del Campidoglio a Roma, è stata realizzata un'analisi di spessore e una mappa di placche e linee di saldatura interne. Per alcuni monili punici in oro sono state studiate parti non otticamente accessibili del manufatto. Infine, in monete di età romana, sono state individuate e analizzate disomogeneità nella composizione del materiale.

Parole chiave: archeometallurgia, termografia, bronzo

INTRODUZIONE

L'analisi termografica di superfici metalliche, basata sulla rivelazione della radiazione infrarossa (IR) emessa da un campione, ha recentemente trovato largo impiego nello studio della struttura e dello stato di conservazione di manufatti artistici ed archeologici. L'importanza di utilizzare tecniche di rivelazione IR in questo campo deriva principalmente dalla loro caratteristica di essere tecniche non distruttive e di non contatto.

Il funzionamento della termografia si basa sull'impiego di una termocamera il cui elemento sensibile è costituito da una matrice di sensori IR. Il segnale che tali sensori generano dipende dall'intensità e dalla lunghezza d'onda della radiazione che li investe. Poiché per la legge di Stefan-Boltzmann ogni corpo emette uno spettro continuo di radiazione che dipende fortemente dalla temperatura, dalle immagini prodotte dalla termocamera si possono ottenere delle mappe di temperatura della superficie di un campione esaminato. In particolare, si può perturbare termicamente la superficie del campione registrando poi, con una serie di mappe termiche, come in ogni suo punto la temperatura vari nel tempo.

Sperimentalmente, nella configurazione più comune di analisi termografica [1], si fa incidere sull'oggetto in esame un impulso luminoso di elevata intensità e breve durata che, per assorbimento, provoca un innalzamento locale della temperatura. Successivamente la temperatura superficiale decade con un processo di rilassamento. Durante questa fase, il calore generato alla superficie del campione (supposto opaco alla radiazione incidente) diffonde principalmente, se questo è in aria, al suo interno fino a raggiungere l'equilibrio termico. La telecamera, durante l'impulso e nel tempo immediatamente successivo, registra ad intervalli regolari mappe termiche della superficie illuminata. Interfacchiando la telecamera ad un calcolatore, attraverso un software di gestione delle immagini, è quindi possibile monitorare il processo di diffusione del calore attraverso serie di mappe che registrano l'evoluzione della temperatura su tutta la superficie osservata. Dal modo in cui il calore diffonde all'interno del

campione è poi possibile, in modo non invasivo, individuare e studiare disomogeneità del materiale, difetti di adesione di lamine o rivestimenti, cricche subsuperficiali, stati di corrosione interni, intrusioni di materiali estranei, analizzare la qualità di saldature, ecc.. Qui di seguito verrà in brevemente illustrato un modello (unidimensionale) [2] che permette di descrivere, per determinate condizioni sperimentali, la diffusione del calore durante il processo di misura. Questo, come vedremo, permette di ricavare, noto lo spessore di un campione, informazioni sulla diffusività termica del materiale di cui è composto e viceversa.

TEORIA.

MODELLO UNIDIMENSIONALE DI DIFFUSIONE DEL CALORE

Consideriamo una lastra di spessore L costituita da materiale omogeneo di densità ρ e calore specifico c_p la cui superficie ($x=0$) viene illuminata al tempo $t=0$ da un breve impulso di energia W . Se il materiale è opaco alla radiazione incidente, alla superficie si ha per assorbimento generazione di calore che diffondendo all'interno del materiale provoca un incremento locale di temperatura $\Delta t(x,t)$ che dipende dalla profondità x e dal tempo t . Se la durata dell'impulso è trascurabile rispetto al tempo di diffusione del calore attraverso lo spessore della lastra, trascurando le perdite di calore verso l'esterno, l'espressione generale dell'incremento di temperatura è:

$$\Delta T(x,t) = \frac{W}{\rho c_p L} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2}{L^2} D t\right) \right] \quad (1)$$

che alla superficie illuminata ($x=0$) diventa

$$\Delta T(0,t) = \frac{W}{\rho c_p L} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2}{L^2} D t\right) \right] \quad (2)$$

In fig.1 è riportata in scala logaritmica la dipendenza temporale di $\Delta t(0,t)$ ottenuta dalla (2) arrestando la serie a $n_{max} = 20$ per diversi spessori [$L=(0.1 \div 1)$ cm] di materiale di diffusività termica $D=0.19 \text{cm}^2 / \text{s}$ (come vedremo, tale valore di D , che è quello della diffusività termica del bronzo, è stato scelto perché ad esso si farà riferimento più avanti nel testo) e assumendo $W / \rho c_p = 1$.

Nel grafico di fig.1 si possono chiaramente individuare per

F. Scudieri, F. Gauzzi, R. Montanari, F. Mercuri, R. Volterri
Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università di Roma "Tor Vergata"
and sez. INFN di Roma "Tor Vergata"

Memoria presentata al 28° Convegno Nazionale AIM, Milano, 8-10 novembre 2000

MEMORIE

2/2001

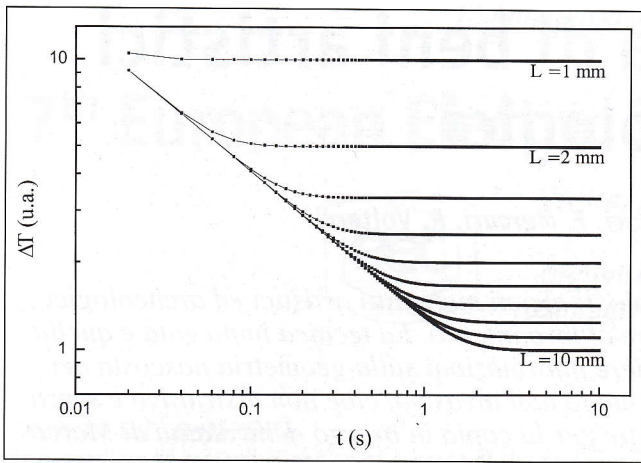


Fig. 1 - Curve di decadimento termico alla superficie illuminata ottenute per spessori diversi di materiale di diffusività termica $D=0.19\text{cm}^2/\text{s}$.

Fig. 1 - Temperature decay curves at the investigated surface obtained for different sample thickness of homogeneous material whose thermal diffusivity value is $D=0.19\text{cm}^2/\text{s}$.

ogni curva due diversi regimi: inizialmente, mentre il calore diffonde attraverso lo spessore del materiale, la temperatura decade come $t^{-1/2}$ analogamente a quanto avviene per la diffusione di calore in un mezzo omogeneo semiinfinito. Quando il calore raggiunge la seconda superficie il campione si porta all'equilibrio alla temperatura $T_{\text{ambiente}} + \Delta T(0, \infty)$. Il punto di intersezione tra questi due regimi lineari definisce il cosiddetto tempo di crossing τ_c e si può dimostrare che $\tau_c(L) = a_p L^2$ dove il valore del coefficiente dipende dalla diffusività termica del materiale.

Nota quindi la diffusività termica del materiale in esame è possibile costruire dalle curve analoghe a quelle di fig.1 dalle quali si può ottenere un grafico che mostra come il tempo di crossing dipenda dal quadrato dello spessore. Nel caso qui riportato di un materiale di diffusività $D=0.19\text{cm}^2/\text{s}$ dalle curve di fig.1 è stato estrapolato il grafico di fig.2.

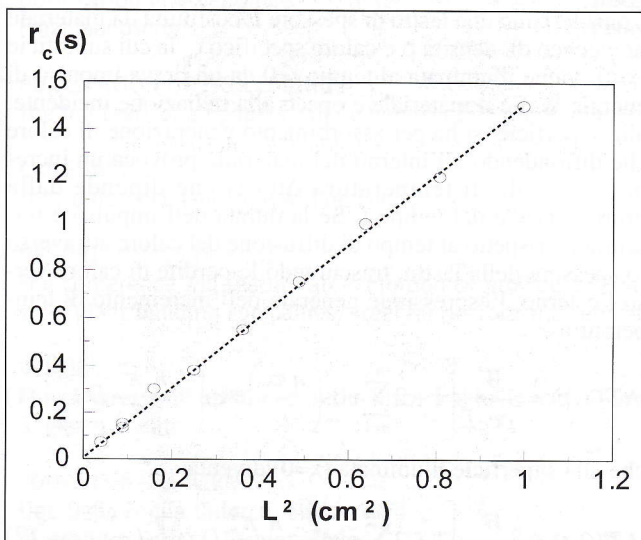


Fig. 2 - Andamento del tempo di crossing in funzione del quadrato dello spessore ricavato dalle curve del grafico di fig. 1.

Fig. 2 - Crossing time τ_c vs. squared thickness, derived from the graph of Fig.1.

Sperimentalmente quindi, per un materiale di diffusività termica nota, dalla determinazione dei tempi di crossing, è possibile realizzare in modo non invasivo mappe di spessore del

campione. D'altro canto, per campioni di geometria nota, in corrispondenza di disomogeneità nella composizione del materiale e di difetti si hanno alterazioni locali del valore della diffusività termica che producono localmente, alla superficie del campione, variazioni anomale della temperatura.

APPARATO SPERIMENTALE E PREPARAZIONE DEI CAMPIONI

Per le analisi termografiche che verranno riportate più avanti, è stata impiegata una termocamera caratterizzata da una matrice di 256x256 elementi di antimoniuro di indio (InSb). La velocità di acquisizione è di 60 immagini/sec e la banda di sensibilità spettrale è di $(3\div 5)\mu\text{m}$. La termocamera è inoltre corredata da un obiettivo con ottiche di germanio. L'illuminazione del campione avviene mediante una coppia di flash, posti ai lati della termocamera, capaci di erogare potenze fino di 3kW ciascuno.

TERMOGRAFIA APPLICATA ALLO STUDIO DI MANUFATTI ARTISTICI ED ARCHEOLOGICI

a) Copia bronzea della statua equestre di Marco Aurelio
Sulla copia in bronzo della statua di Marco Aurelio collocata in piazza del Campidoglio a Roma, sono state realizzate delle analisi termografiche con lo scopo di monitorare dall'esterno, in modo non distruttivo, lo spessore di alcune parti del manufatto, la posizione linee di saldatura e di placche interne di rinforzo.

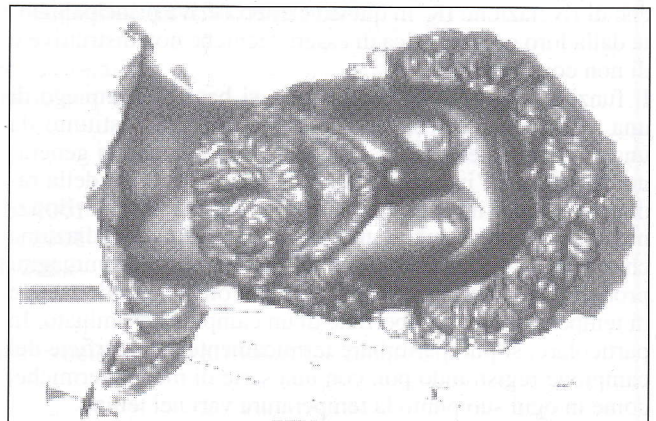


Fig. 3a - Testa di Marco Aurelio: fotografia.
Fig. 3a - Head of Marco Aurelio: photograph.

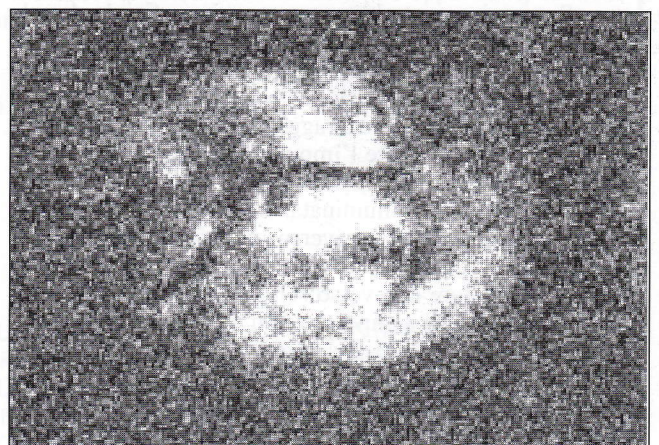


Fig. 3b - Testa di Marco Aurelio: termografia.
Fig. 3b - Head of Marco Aurelio: thermograph.

In fig.3a è riportata la fotografia della testa del cavaliere. Si noti l'aspetto uniformemente scuro dovuto alla grafite con cui è stato ricoperto il campione per aumentarne l'emissività. La fig.3b invece rappresenta una termografia della stessa parte registrata 5s dopo l'illuminazione dei flash.

Le zone più chiare rappresentano quelle calde e corrispondono a zone di spessore minore dove il campione termalizza appunto a temperatura più alta (vedi grafico fig.1). Il valore della diffusività termica del bronzo impiegato per la fusione è $D=0.19\text{cm}^2/\text{s}$ e cioè quello utilizzato per ricavare i grafici delle figg.1 e 2. Procedendo nel modo indicato nel paragrafo precedente si è potuto determinare lo spessore dello strato di fusione in vari punti del viso. Nella tabella I sono riportati alcuni di questi valori.

PARTE ANALIZZATA	Spessore (mm)
Tra naso e occhi	4.8
Sotto gli occhi	6.0
Sulla tempia	6.2
Sull'occhio	6.3
Zone laterali della fronte	7.1
Sotto le narici	9.2

Tab. I - Spessori del bronzo di fusione in diversi punti del viso del cavaliere.

Table I - Bronze thickness in different areas of the rider's face.

Un altro importante tipo di analisi termografica effettuata sulla statua di Marco Aurelio è quella relativa alla mappatura delle linee interne di saldatura.

In fig.4 è riportata un'immagine relativa ad un lato del ventre del cavallo. Da questa termografia risulta chiaramente evidente una linea scura verticale che corrisponde ad una saldatura interna lungo la quale è presente una placca di sostegno.

Nella termografia di fig.5 infine sono evidenziate due bolle di fusione del bronzo sotto la superficie. La loro dimensione è di circa 3 e 2mm mentre la profondità alla quale si trovano può essere determinata dal ritardo della formazione della loro immagine rispetto all'istante dell'illuminazione dei flash.



Fig. 4 - Linea interna di saldatura con sovrapposta placca di rinforzo.

Fig. 4 - Welding line with superimposed reinforcement plate.

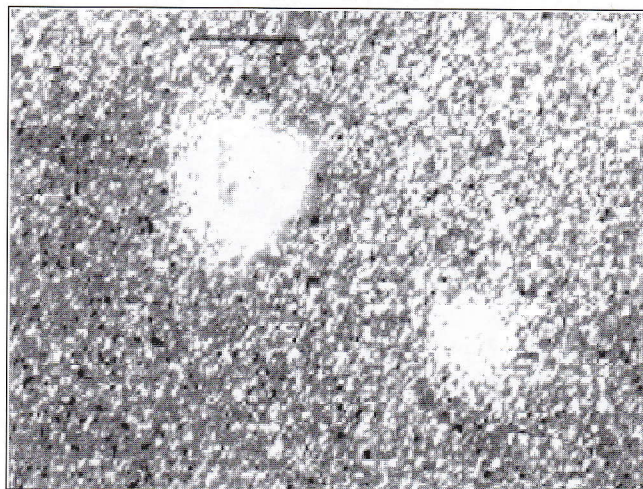


Fig. 5 - Bolle nel bronzo di fusione sotto la superficie.

Fig. 5 - Subsurface voids.

c) Monili punici

Le figg. 6a e 6b rappresentano due esempi di indagine strutturale eseguita su due monili punici: un orecchino (6a) e un anello (6b). Per quanto riguarda l'orecchino, la parte eviden-

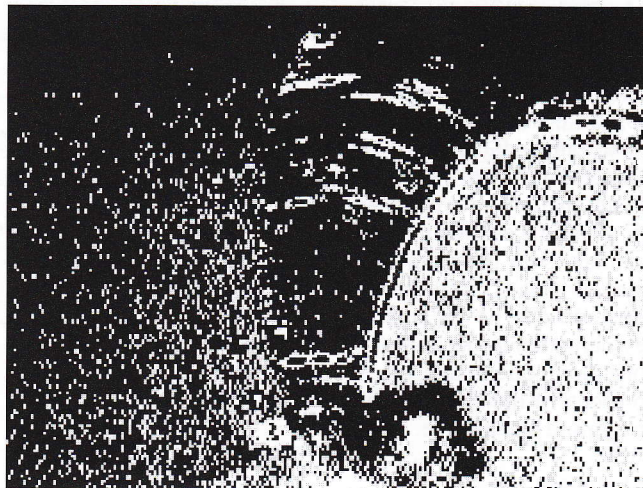


Fig. 6a - Orecchino punico: dettaglio di avvolgimento in filo d'oro.

Fig. 6a - Phoenician-Punic earring: gold wire coil.

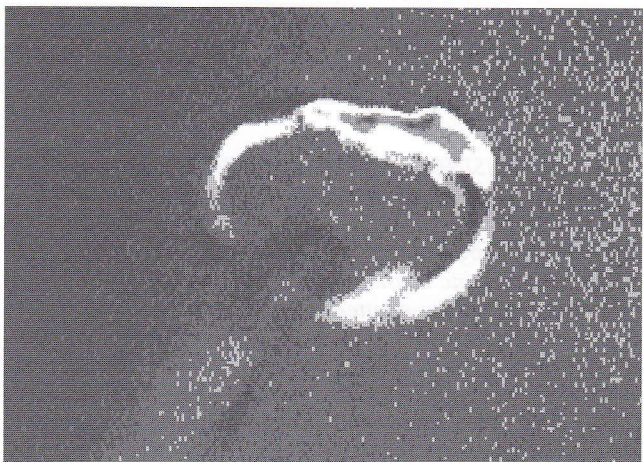


Fig. 6b - Anello punico: dettaglio della saldatura del castone.

Fig. 6b - Phoenician-Punic ring: collet welding.

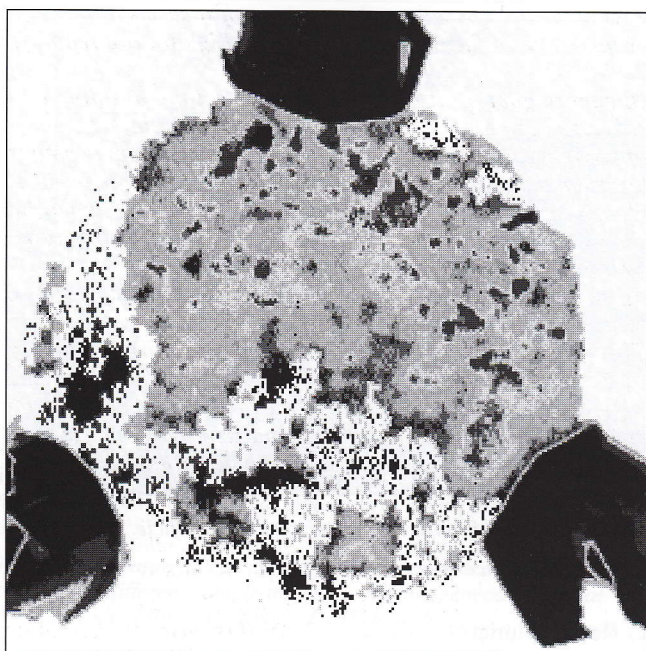


Fig. 7a - Moneta di età romana: termografia.

Fig. 7a - Roman coin (1st century a.C.): thermograph.

ziata in fig.6a è quella di un avvolgimento di un sottile filo d'oro (sezione di 0.3mm) intorno alla struttura principale. La termografia permette di individuare quei punti nei quali il filo non è in contatto col corpo dell'orecchino che, essendo punti più caldi, appaiono chiari nell'immagine di contrasto. La termografia di fig.6b, invece è relativa alla parte interna di un'anello d'oro. Nella zona evidenziata si nota un volume di materiale estraneo utilizzato per la saldatura del castone altrimenti solo parzialmente visibile con la normale osservazione visiva. Questo materiale, anche a causa dello stato di degrado che ne ha aumentato la porosità, è caratterizzato evidentemente da un valore di diffusività termica ben più piccolo di quello dell'oro. Questo fa sì che nella zona dove è presente il materiale si abbia un incremento di temperatura maggiore che altrove.

b) Monete romane

Viene infine presentato un esempio di analisi dello stato di conservazione di una moneta di età romana la cui immagine



Fig. 7b - Moneta di età romana: fotografia.

Fig. 7b - Roman coin (1st century a.C.): photograph.

è riportata in fig. 7b. Esteriormente la moneta, dopo la pulizia da concrezioni, non presenta evidenti disomogeneità nel suo stato di conservazione.

Tale disomogeneità però viene chiaramente evidenziata dalla termografia di fig.7a dove si individuano facilmente due diverse aree. Quella in basso, la più calda, presenta probabilmente un maggiore stato di corrosione interna o comunque rappresenta un diverso stato di conservazione del materiale rispetto a quello della parte alta dell'immagine.

BIBLIOGRAFIA

- 1) W.J. PARKER, R.J. JENKINS, C.P. BUTLER, and G.L. ABBOTT, *J. Appl. Phys.* 32 (1961) p.1679
- 2) H.S. CARSLAW and J.C. JAEGER, *Conduction of Heat in Solids*, Clarendon Press, Oxford (1959).
- 3) N. JELPO, R. MONTANARI, *La Metallurgia Italiana*, 1 (2000), p. 21.

A B S T R A C T

ANALISI TERMOGRAFICA DI BENI ARTISTICI ED ARCHEOLOGICI

Infrared Thermography

The thermographic method, based on the analysis of the infrared (IR) radiation emitted by a sample, has been widely used to investigate the structure and preservation state of artistic heritage and archaeological findings. The main element of a thermographic set-up is an IR camera whose detector is an array of elements sensitive to the IR radiation. The signal generated by each IR element, depends on the intensity and wavelength of the radiation incident on it. Since, according to the Stefan-Boltzmann law, the radiation spectra emitted by every body strongly depends on its temperature, it is possible, by the IR camera, to obtain a temperature

map of the sample surface. In particular, a series of temperature maps can be recorded after a short thermal perturbation of the sample surface (pulse IR Thermography). What we get in this way, is the temperature variation vs. time from different areas of the sample surface. Since the temperature decay at the surface depends on the heat diffusion process inside the sample, we are therefore able by thermographic analysis, to obtain information on the subsurface sample structure. In conclusion, thermography represents a non-invasive (non-contact) technique to investigate the buried geometry, inhomogeneities, corrosion, defects as disbonding, delaminations or voids as well as the quality of welding and reinforcement elements.

Finally it is worthwhile to note that, for homogeneous material whose thermal properties (thermal diffusivity in particu-

lar) are known, thermography provides, by the analysis of the surface temperature decay, a method for the determination of the sample thickness even when one of the two surfaces is not mechanically or optically accessible.

Experimental set-up

In the present study, the IR camera detector was an array of 256x256 InSb elements with a spectral sensitivity corresponding to 3÷5 µm wavelength range. The image acquisition rate was 60 frames/sec. The camera was equipped with germanium optics. The thermal perturbation was obtained by absorption of light produced by 3kW powerful flash lamps. The light pulse duration was 2.5ms at half height of its intensity peak.

Experimental Results

The first study we report on, has been carried out on a copy of the bronze equestrian statue of the roman emperor Marco Aurelio made by foundry of IPZS (Italian Printing and Minting Institute). The composition of the bronze used for the copy was Cu 88, Sn 7, Zn 5 (wt%) and its thermal diffusivity was previously determined by analysing pieces of the same material shaped with known geometry. We have first performed a thickness study of the rider's face (Fig.3a) based on the analysis of the surface temperature decay described by equation 2 which is valid for a unidimensional heat diffusion process. In Fig.1 the temperature decay curves vs. time are reported for the bronze, whose thermal diffusivity value is $D=0.19\text{cm}^2/\text{s}$, employed in the statue copy. From this curves is possible to derive the graph of Fig 2 which relates the sample thickness to the so called crossing time in which can be determined from the experimental data for every area of the sample surface. This makes therefore possible to perform a thickness map of the investigated sample. As far it concerns the above mentioned rider's face, the results of the

thickness study based on the analysis of a series of thermographs (one of them being reported in Fig.3b), are reported in Table I.

One more goal of this work, was to detect the position, and check the quality, of internal welding and reinforcements. In the thermograph of Fig.4 the detection of a homogeneous internal welding line with a superimposed reinforcement plate is clearly evident. In Fig. 5 finally, the thermograph shows two inner voids in one of the bronze part before its welding to the statue.

Further details about the study of the copy of the statue of Marco Aurelio the can found in Ref. 3.

Thermographic analysis has been also performed on two pieces of Phoenicians jewellery. In one case, the studied sample was an earring and the purpose was to detect bad mechanical contacts between a gold wire coil and its support and look for the possible presence of hidden welding and empty parts. The result is shown in Fig.6a where in the thermograph the light parts of the coil represent the hottest ones. They are localised where an air gap, which acts as a thermal barrier, is present between wire and support. A second analysed jewel, consists in a ring. By the thermograph reported in Fig 6b was possible in this case, to determine the volume of material, partly hidden under the outer gold leaf coating, used to weld the collet to the ring support.

Finally a roman coin (fig.7b), made in the 1st century a.C., has been analysed. In the thermograph of Fig.7a two different areas are evident showing a clear inhomogeneity in the material composition.

Conclusions

Pulse IR thermography was used in the present study as a non-invasive (non-destructive, non-contact) method to investigate structural aspects in different samples of artistic and archaeological heritage.