



OFF-LINE METHODS FOR DETERMINING AIR QUALITY IN MUSEUMS

*Vincenzo Franzitta, Patrizia Ferrante, Maria La Gennusa, Gianfranco Rizzo, Gianluca Scaccianoce **

Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali (DREAM)
Università degli Studi di Palermo

Keywords: air quality; monitoring air quality; off-line sensors of air quality; air conditioned museum environments

1. Introduction

The micro-climate of museum environments requires particular attention due to the wide range of works of art on display in museums, the different materials from which these cultural artefacts are made (eg stone, marble, cloth and wood etc.), and the importance of these objects which, in the majority of cases, are unique examples of art. With the aim of conserving and safe-guarding works of art [1-11], the maintenance of micro-climatic conditions in museum environments has for some time been the object of study and research. It is possible to trace numerous sources in the literature relating to the guaranteeing of optimum micro-climatic conditions in enclosed museum spaces and particularly the deterioration of materials. These demands concern thermal-hygrometric parameters [12] and visual parameters [13], which are usually easy to monitor without making excessive demands on display spaces [14]. Various regulations advise micro-climatic conditions which would be ideal for museum environments [15-19]. Often the main concerns for museum staff are the best way to display works of art and, in some cases, to reach optimum conditions for conserving cultural artefacts without paying much attention to visitors' and employees' comfort.

Recent studies have focused their attention on conservation conditions, highlighting the frequent conflict between the environmental demands relating to the conservation of works of art and visitors' comfort [20], attempting to establish a practical compromise between these demands [21]. The micro-climate of museum spaces plays a fundamen-

* Corresponding author: e-mail scaccianoce@dream.unipa.it

tal role as regards the deterioration of the materials of cultural artefacts as do levels of internal air pollution which, particularly in urban environments, can easily reach external pollution levels, particularly when appropriate air filtering systems are not used [22-24].

Notwithstanding the copious studies relating to the characteristics of air quality in museums, the nature of current technical standards appears even more problematic. Indeed, a definitive list of the recommended values for the maximum concentration of atmospheric pollutants is not yet available, thus constituting a serious limitation to the work of technicians involved in monitoring and checking air quality in museums, whether this be mechanical or not.

Table 1 shows a selection of permitted maximum values of the main pollutants typically found in museums, as mentioned in the literature [3, 25-28].

The aim of analysing and monitoring air quality in an enclosed space is to identify the gas pollutants in the air and, where possible, to measure their concentration continuously or on-line. However, an analysis of these pollutants indicates whether the air in a given environment is more or less damaging via the use of sensors (mainly chemical), which

Table 1. Permitted maximum concentrations of gassy pollutants in museums.

Source	SO ₂ (µg/m ³)	O ₃ (µg/m ³)	NO ₂ (µg/m ³)	Particulate
Archives II. Adelphi, Maryland	2.5	25	5	–
California State Archives, Sacramento	1.0	25	5	–
DPCP Dutch government	< 1.0	< 2	< 5	use of the best technology available
G Thomson	< 10	2	< 10	–
Minnesota State Archives	1	5	5	–
NBS	1 (SO _x)	25	5 (NO _x)	< 75 µg/m ³ removal percentage > 95% for particulate matter with a diameter of > 2 µm
NS Bear and PN Banks	< 1	2.5	< 5	–
National Information Standard Organ (USA)	< 12.5-25	< 10-20	< 10–20 (NO _x)	removal percentage > 95%
Newberry Library	< 10 (SO _x)	2	<10 (NO _x)	–
P Brimblecombe	≤ 1	≤ 2	≤ 4.7	removal percentage > 95%
Purafil™	< 1.0	< 2	< 5	< 75 µg/m ³
US Department of Commerce	< 1	< 25	< 5	< 75 µg/m ³ (particulate)
UNI standard 10586	≤ 2	≤ 2	≤ 2 (per NO _x)	≤ 50 µg/m ³

Table 2. Approaches for analysing and monitoring IAQ [29].

Approach	Technique	Method
Sensorial Corrosion test	Identifying smells Recognising signs of corrosion	Human nose Metallic plates
Industrial measurements	Measuring physical properties	Sensors
Electrometric analysis	Determining CO ₂ , redox potential, ammonia, VOCs	Specific electro-chemical sensors

are generally off-line and off-time. Table 2 summarises different methods for monitoring and specifying the air quality in an internal environment [29].

Based on the olfactory sense, the sensorial approach can provide useful information for characterising air quality but only from a subjective point of view. P.O. Fanger originally proposed a methodology, now found in a CEN Regulation *Ventilation for Buildings – Design Criteria for the Indoor Environment* [30], which presents several challenges, such as: the sample of people involved in the study, the correlation with occupants' comfort and health, and its correlation with physical indoor parameters.

An objective approach involves the effective measurement of a reference gas; this is generally considered to be CO₂, as an index of the presence of human beings. Thresholds of acceptability and safety are associated with concentration of this gas. This method correlates air quality mainly with the human presence of CO₂ in the display area and does not provide information relating to other possible sources of pollution. Unfortunately, the equipment for verifying the extent of air pollution is generally bulky and not in consonance with the demands of museum displays, where aesthetic considerations often prevail.

In order to obviate these problems, a different approach, based on the variation in physical-chemical characteristics of a type of tag, can be used. When deployed in a display space for a certain period of time, it can provide information regarding the air quality in that environment. This approach also has its limitations as an analysis of the tag mainly provides information relating to the reactivity of material/s which are similar to the sample material. Neither continuous nor real time monitoring is performed but this approach provides us with a qualitative evaluation. Nevertheless, this approach generally has a low aesthetic impact and reduced costs as compared with the objective approach.

Table 3. Damage produced by polluting gases on selected and typical materials of monitored works of art [23].

Material type	Type of damage	Polluting gas
Paintings	Discolouration, staining	Sulphur oxide, hydrogen sulphide, alkaline sprays
Dyes, pigments	Discolouration, structural weakening	Ozone, nitrogen oxide
Stone, marble, plaster	Deterioration, staining, crumbling	Sulphur oxide, nitric acid, nitrogen oxide
Varnishes	Blackening	Hydrogen sulphide
Frescoes	Crumbling of structure	Sulphuric acid, nitrogen oxide

The results of three cases studies, which monitored indoor air quality in museum spaces will be reported in this Paper:

1. an analysis of air quality in several galleries of the Regional Gallery of Sicily (Palazzo Abatellis) in Palermo, performed using bimetallic tags (Purafil™ tags) in a restricted space (their original application was in industrial environments);
2. a second case analyses the air quality in various galleries in the Regional Gallery of Sicily (Palazzo Abatellis) in Palermo, performed with small marble strips (marble tags); and
3. the third case examined the air quality in the Diocesan Museum of Palermo and was performed with absorbent fibres (absorbent fibre tags), previously applied to smaller spaces, not museums.

The works of art monitored in 1 to 3 above are mainly composed of the materials outlined in Table 3, as is the damage caused by polluting gases.

2. Metallic reactive tags

Initial measurements of the air quality were performed by installing bimetallic reactive (Purafil™) tags [31], whose original use was intended for industrial environments.

2.1. Base physical-chemical principle

The reactive (or corrosive) approach is based on a significantly different understanding of traditional approaches to measuring parameters. Rather than researching and

measuring polluting gases present in the environment under investigation, emphasis is placed on ascertaining the effects of deterioration which contaminating substances have on the various works of art [32]. This method was originally proposed for industrial environments but then applied to museums as part of a national measurement programme, which was promoted by the *Comitato Termotecnico Italiano* and involved some of the most important museums in Italy.

The reactive (or corrosive) method is based on measuring the reactivity of two metallic samples, copper and silver, which have been placed together with the cultural artefacts over an extended period of time. The thickness of the layer of corrosive products of the sample is an indication of the reactivity of the air. The relationship between the cause (polluting gas) and the corrosive effect of the tag can be described by the following formula [32]:

$$x = k \cdot t^n \quad (1)$$

where x represents the thickness of the layer of the corrosive products (generally measured in Å), occurring after an exposure time t , n is an exponent, lesser or equal to one, which is related to the proportionality constant k and dependent on a value x . Under the same conditions of exposure and for comparative analysis, the proportionality constant no longer has any influence, due to its simplification; the function $n(x)$ is assumed to be equal to 0.3 (a light effect), 0.5 (moderate) or 1 (severe) on the basis of the reactivity level of the air under investigation, as suggested by the ISA Regulation [22] for industrial environments.

Based on the corrosive approach, various methods of environmental classification have been proposed for the conservation of historical-artistic artefacts. Whilst rejecting out of hand the classification proposed by the ISA Regulation [22] (referring as it does to the reactivity of air in industrial environments), we propose in this Paper to use the classification proposed by the Purafil IncTM company [31]. The previously-described tags have been commercially produced and distributed and Purafil IncTM's classification involves five categories for describing air quality with different threshold corrosion values for copper and silver over a period of 30 days, as illustrated in Table 4. A difference of 50 Å between the threshold values of copper and silver plates is due to the formation of 50 Å plates of oxidised copper, which formed during manufacture.

In conclusion, a study group of the *Comitato Termotecnico Italiano* has proposed a simplified classification, based exclusively on thresholds *requiring attention* and *indicating danger* for each tag, and this is shown in Table 5.

Table 4. Classification hypothesis of air in museums [32].

Air quality	Copper		Silver	
	Class	Corrosion (Å/30 days)	Class	Corrosion (Å/30 days)
Very pure	C1	< 90	S1	< 40
Pure	C2	< 150	S2	< 100
Clean	C3	< 250	S3	< 200
Slightly contaminated	C4	< 350	S4	<300
Contaminated	C5	≥ 350	S5	≥ 300

Table 5. Environmental classification, as proposed by CTI.

Threshold	Copper corrosion (Å/30 days)	Silver corrosion (Å/30 days)
Requiring attention	250	200
danger	350	300

2.2. Monitoring

During September and November 1997, an environmental field study was performed at the Regional Gallery of Sicily (Palazzo Abatellis), the aim of which was to ascertain the quality of indoor air in various display spaces, typical of those throughout the museum. In terms of their importance (and, therefore, need for protection), three works of art on display in the museum were chosen: *L'Annunziata* by Antonello da Messina, the large fresco *The Triumph of Death* and the *Malaga* amphora. This research was conducted as part of a huge environmental monitoring programme performed throughout the museum.

Using small wooden frames (designed and constructed by museum staff) as supports, four reactive tags were placed in three galleries (see colour Figure 1, p. 232). In addition to the tag placed on the wall, a further tag was installed inside the case containing the *L'Annunziata*, the aim of which was to highlight possible differences in air quality between the gallery and the space immediately in contact with this work of art.

It is important to underline that the general micro-climatic conditions of the museum were certainly far from ideal, as the works of art on display were subject to changes in

external temperature due to the absence of air-conditioning. And this was so even if these conditions were mitigated by the marked thermal inertia of the structure of the building, which temporally reduced and removed the wave of external heat. Moreover, the Malaga vase, located in a colonnade adjacent to the building was significantly subjected to external thermo-hygrometric conditions, even though it is sheltered from the rain. Palermo is subject to severe pollution which is mainly produced by urban public transport. Whilst contributing to mitigating these polluting effects, the vicinity of the museum to the sea produces other characteristics of a marine climate.

Whilst facilitating low-impact environmental monitoring (an advantage), the reactivity methodology presented in this Paper also presents limitations which should be taken into consideration: the tag method is particularly suited to highlighting the presence of substances which react to metal rather than stone-based materials and paintings. Moreover, it only empirically compares the phenomenon of corrosion (the two metal tests) with the hostility of the environment.

2.3. Results

The results of the analysis of the three display spaces have been presented as a Table in Figure 2 and summarised in a diagram in Figure 3. The latter reports the corrosion thicknesses of the copper strips (left) and silver (right). Classes of air purity, according to the Purafil Inc™ classification, are further highlighted in the diagrams with horizontal lines. Following the CT classification, it is necessary, however, only to refer to classes C4 (threshold indicating *attention required*) and C5 (threshold indicating *danger*).

The tags numbered 1, 2 and 3 refer to the spaces in which *L'Annunziata*, the case containing this painting and *The Triumph of Death* were *in situ* respectively for three months; the tags numbered 4, 5 and 6 all refer to the *Vaso Malaga*, on display for one month each. Regarding the micro-climate and environmental pollution for the period under investigation, the more immediate consideration of this initial analysis is

CORROSION FILM COMPOSITION			
	30 Days	<---PROJECTIONS--->	
		1 Year	5 Year
COPPER FILMS			
Cu ₂ S	149 Å	520 Å	1162 Å
Cu ₂ O	301 Å	1051 Å	2349 Å
Unknowns	191 Å	667 Å	1492 Å
Totals	642 Å	2238 Å	5004 Å
SILVER FILMS			
AgCl	28 Å	346 Å	1731 Å
Ag ₂ S	83 Å	1004 Å	5021 Å
Unknowns	316 Å	3842 Å	19209 Å
Totals	427 Å	5192 Å	25961 Å
GOLD PORE CORROSION: Unknown			
Note: 1000 Å = 0.1 μ			

Figure 2. Example of the relationships of the analysis of the Purafil Inc™ tags.

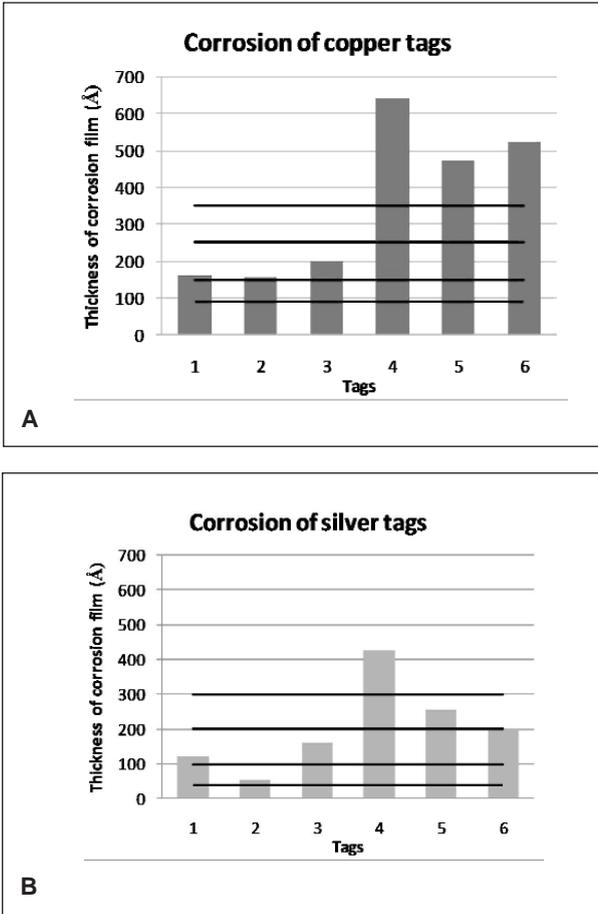


Figure 3. Thickness in Å of the corrosion of the copper (A) and silver (B) tags, indicating the class of air purity, according to the Purafil Inc™ classification.

that the air purity of the internal spaces in the museum were acceptable, even if not totally satisfactory. Moreover, the protective effect of the case enclosing *L'Annunziata* on the silver tag is evident. However, the micro-climate around the amphora, constantly in excess of the *danger* threshold, is a cause of great concern and indicates the need for robust environmental intervention.

3. Marble tags

The second set of measurements of air quality was undertaken by installing sensors, in the form of small marble strips. The validation of this research methodology forms part

of a CNR research programme *Conservazione Opere d'Arte*, which is based in Rome. This programme identifies indices of risk which facilitate the evaluation of the reactivity of one well-defined environment, compared with another (the latter chosen as a reference point) for a specified material, from which the cultural artefact is made.

3.1. Base physical-chemical principle

Analysing the second set of measurements of air quality involved exposing small marble strips to the reactivity of the air in a museum for a fixed period of time, thus acting as off-line sensors in evaluating the air quality of a given environment. The strips did not have to be very thick and comparable in thickness to those which normally measure air reactivity; they were, therefore, more sensitive to different levels of pollution. Whilst performed on very delicate sensors, the analyses are physical in nature, that is, they evaluate the mechanical degradation of the marble on display for a certain period of time. Chemical analyses were also undertaken but it was observed that they contributed little to the research into the general indicators of air quality and excluded from this Paper [33].

As a general evaluative index of air quality, *hardness* or *resistance* is the mechanical property with which a material resists penetration by a harder body. The method used for measuring hardness is the Vickers' method ($HV_{0,2}$) and it involves cutting the surface of a marble strip (sensor) with a square-based pyramidal indenter at an angle of 136° to the vertex, with a nominal test load of $F = 1,961$ N (200g [33]). The diagonal, d , of the mark left by the indenter is then measured by microscope ($\times 400$). The hardness value $HV_{0,2}$ can be obtained from the value of the diagonal, thus:

$$HV_{0,2} = 1854 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (2)$$

Various measurements for hardness should be performed for each marble strip when ascertaining the average hardness value. Moreover, the marble strips must be subject to processes of lapping prior to performing the tests for hardness under standardised conditions.

3.2. Monitoring

The research methodology outlined in this Paper was applied to the same display spaces in the Regional Gallery of Sicily (Palazzo Abatellis), where the research using the Purafil™ tags, *L'Annunziata* by Antonello da Messina, *The Triumph of Death* fresco, the *Madonna della Neve* sculpture and the *Malaga* amphora all took place. The marble sam-

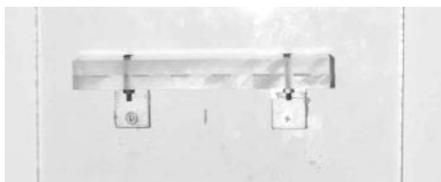


Figure 4. Photograph of Plexiglas support with small marble strips.

Table 5. Micro-hardness measurements of the marble samples located in Palazzo Abatellis.

Artefact	Average	$\Delta HV_{0,2}$
L'Annunziata	123.3	6.6
The Triumph of Death	122.3	7.6
The Malaga amphora	120.5	9.4
Madonna della Neve	121.9	8.0
White samples	129.9	(Ref)

ples were installed on 14 July 2001 and Plexiglas supports (Figure 4) were built to minimize their visual impact.

After a period of approximately six months (24 January 2002), the marble strips were removed and sent directly to the CNR *Conservazione Opere d'Arte* research laboratories in Rome, where the tests for hardness were performed. The results of these tests and the $DHV_{0,2}$ deviation, compared to the micro-hardness of the white sample, are shown in Table 6.

3.3. Results

The results obtained from the analysis did not directly provide information since a scale (reading template) had not been constructed. The CNR, therefore, proceeded from this stage in the research, comparing the results obtained from various measurements taken by different museums in Italy. However, if we wanted to qualitatively compare the results from the marble strips with those of the Purafil Inc™ tags (taking the values obtained for the *Vaso Malaga* display spaces as reference points), we would observe that the results correlate with those obtained from the Purafil Inc™ tags, as demonstrated in Figure 5 (see colour Figure 5, p. 232). Indeed, a comparative analysis of the results demonstrates that the pollution to which the *Malaga* amphora is subjected (as indicated by the marble strips) is greater than that of *The Triumph of Death* and *l'Annunziata*. Even

on a qualitative level, the marble strips provide credible information, as is the case with that obtained from the Purafil Inc™ tags.

4. Absorbent fibre tags

A third measurement of air quality was carried out in the Diocesan Museum in Palermo [34] with the use of absorbent fibres. The aim of this research phase was to identify the presence of volatile organic compounds (VOCs) in the museum spaces, making use of specific absorbent fibres. In turn, it would, therefore, be possible to evaluate the presence of benzene or chlorinate hydrocarbons, which are particularly damaging to humans. This phase took place in two spaces which will henceforth be nominated *Hall No. VIII* and *Hall No. XII*.

4.1. Base physical-chemical principle

The technique using absorbent fibre tags is known as *solid phase micro extraction (SPME)*. It involves a simple and relatively cheap method with which to extract samples and is capable of identifying very low levels of organic compounds. The technique works by extracting and concentrating miscellaneous organic compounds without necessitating the use of chemical solvents. This is a particular advantage from a Health and Safety point of view and it obviates the continuous use of expensive and sophisticated equipment, thus making financial savings [35].

The SPME technique is based on the chemical-physical principle of the division of analyte between the solid phase (coating the silicon fibre) and the gaseous phase of the sample under investigation. The tag used in applying the SPME technique comprises one fibre of melted silicon, a particularly absorbent material which enables the “capture” of substances with wide-ranging polarity. This fibre is generally 1 cm long with a diameter of 100 µm, covered with a polymeric, adsorbent material (porous carbon polymer). The fibres share various stable phases and different coatings have different thicknesses, which permits them to absorb different quantities of analytes on polymeric surfaces. The principal advantages of this technique are [36, 37]:

- ✓ a reduction of up to 70% of the preparation time of the samples;
- ✓ no need to use chemical solvents;
- ✓ the possibility of using the fibre for up to 100 extractions with evident cost benefits;
- ✓ it is a flexible system, which can be interfaced with the range of gas chromatography (GC) methods; and
- ✓ the operation can be automated.

4.2. Monitoring [34]

Monitoring comprises two phases: adsorption of the gas from the display space occurs in the first phase, whilst desorption of the analytes into the fibre takes place in the second phase in the laboratory. The latter phase involves a gas chromatograph (GC) and it is used to separate the various components in the mixture, together with a mass spectrometer (MS), in order to identify the various volatile compounds. A carboxen/PDMS (polymethylsiloxane) fibre was used in this research, with a coating which was 85 µm thick as it was held to be the most suitable in adsorbing VOCs. To facilitate the exposure of the pollutants in the air in the display halls, a lightweight, protective and parallelepiped support (8 cm square and 12 cm high) was constructed in Plexiglas, as shown in Figure 5 (see colour Figure 5, p. 232). The fibre was exposed to the pollutants for 24 hours and thereafter was isolated by means of a 5 ml clear-glass vial, whose screw top was a Teflon washer. The syringe-fibre-vial equipment was enclosed in a heatproof bag at a low temperature whilst being transported to the laboratory in order to thermally isolate the sample.

The probe in Display Hall No. XII was positioned on a base in the centre of the display space whilst in Display Hall No. VIII it was simultaneously placed in front of the marble platform by Gagini, which is located near the outer wall (see colour Figure 6, p. 232). The fibres were analysed in the laboratory by means of gas chromatography model GC-17A, which was linked to a mass spectrometry detector model QP5000, both produced by the Shimadzu™ company.

In order to identify the presence of volatiles organic substances in the two display halls, the differing chromatograms obtained from the CG-MS system were interpreted. Of the numerous methods which can be used in identifying adsorbed gases from the fibre, two were chosen: the first is based on a comparison of the retention time (as revealed by the chromatogram) with the reading data; the second method was based on a comparison of the mass spectrum of the given substance with the reading produced. The operating conditions and equipment features are shown in Table 7.

In the first method the temperature programme was experimentally determined (an increase in temperature of 8°C/minute) until an effective separation of the compounds in the sample was effected. This produced chromatograms with well-defined peaks which did not overlap. The second method was used to identify a particular substance: this is based on the use of a mass spectrometer which was directly connected to the gas chromatograph. Whilst recording the mass spectrum of typical ions (unique for each chemi-

Table 7. Operating conditions and equipment features.

Parameter	Value
Diameter of internal column	0.32 mm
Column length	30 metres
Oven range	40°C-210°C
Gas eluent	helium
Surveying technique	mass spectrometry
Injecting temperature	310°C
Helium flow in the column	0.9 ml/min
Initial oven temperature	40°C
Isotherm	stable at 40°C for 2 minutes
Programme temperature	an increase of 8°C/min up to 210°C
Mass range	45-300 m/z
Detector power	1.2 kvolts

cal element), it also identifies the components. Taking into consideration that an abscissa chromatogram reproduces the time scale of the retention times, the diagrams for the two display halls were analysed (see colour Figures 7 and 8, p. 233).

The two chromatograms identified the presence of traces of various hydrocarbons, specifically, benzene, toluene, 1.2 dichloropropane and 1.2 dimethylbenzene in both display halls. Table 8 shows the results obtained in terms of components identified and related retention times.

Analysing the other peaks in the chromatogram, we can suppose the probable presence of an elevated number of linear, saturated hydrocarbons and volatile compounds, such as formaldehydes and alcohol with a low molecular weight. Mass spectra were used in a subsequent phase to further validate these results.

4.3. Results

In order to examine the qualitative features of the air samples in the Diocesan museum, an innovative methodology – the SPME technique – of the adsorption of volatile

Table 8. Table of results.

Substance	Ret. time [min]
Benzene	7.29
Dichloropropane (1.2)	8.40
Toluene	10.14
Dimethylbenzene (1.2)	12.90

gases was used. This may be considered routine in other contexts (smaller and self-contained) but it is still infrequently used in a larger environment, where works of art are conserved. The measurements used in this research verified the possible application of this methodology in evaluating air quality in museum environments. Indeed, it revealed the presence of various pollutants in the air, but not their quantity; this aspect, the subject of future research, should be ascertained by studying the characteristics of the adsorption of these types of fibres.

5. Discussion and conclusion

Analysing the measurements taken in this research and applying different methodologies, it can be confirmed that the air quality in the display halls in Palazzo Abatellis are "acceptable", at least with reference to the time period under consideration. This, however, excludes the display hall containing the *Malaga* amphora; intervention is required due to the deleterious environmental conditions to which it is exposed.

A reference scale for the measurements of the marble samples does not currently exist and little can, therefore, be said regarding these results. Nevertheless, the comparison between other samples from other Italian museums has provided us with general information about their environmental state when comparing the various stone samples on display. According to this qualitative judgement, it would seem that the air quality in the museum display halls is "averagely" polluted, the results produced correlating with those of the Purafil Inc™ tags.

The application of the SPME technique in the Diocesan Museum validated the suitability of this technique (the micro-extraction of the solid phase); it had previously been used in small environments as a valid method for the initial evaluation of volatile, organic substances present in museum environments. The micro-extraction of the solid phase exploits the use of fibres of different thicknesses and polarities in order to perform selective sampling in function of the molecular weights, volatility and polarity of the substance under investigation. The SPME technique revealed traces of various organic substances, such as benzene, toluene and other hydrocarbons (1,2 dimethylbenzene and 1,2 dichloropropane) in the display halls. All of these substances can have deleterious effects on humans and the works of art on display since they can enhance the formation of aggressive acids. Given the growing necessity of obtaining results from simple, quick, cheap and easily applicable methods, the SPME technique is more suited to analysing organic traces as it is generally considered the most innovative of techniques in the provision of enhanced, future applications.

Evidently, the main intervention for improving air quality in the museum environment concerns technical solutions and it is necessary to bear in mind its distinctive characteristics: on the one hand, any intervention risks compromising the display criteria (not without its complications) but, on the other hand, the museum is itself a listed building; the installation of cumbersome air-conditioning plants can only be pondered with extreme caution.

References

- [1] FELLER R.L. 1994, *Accelerated Ageing Photochemical and Thermal Aspects*, in D. Berland (editor), The J. Paul Getty Trust.
- [2] ARBIZZANI R., CASELLATO U., FIORIN E., NODARI L., RUSSO U., VIGATO P.A. 2004, *Decay markers for the preventative conservation and maintenance of paintings*, Journal of Cultural Heritage 5/2004, Elsevier, 167-182.
- [3] CAMUFFO D. 1998, *Microclimate for cultural heritage*, Amsterdam, Elsevier.
- [4] CASSAR M. 1995, *Environmental Management – Guidelines for Museums and Galleries*, London & New York, Routledge.
- [5] APPELBAUM B. 1991, *Guide to environmental protection of collection*, Connecticut, Sound View Press, Madison.
- [6] THOMSON G. 1986, *The museum environmental* (2nd ed.), London, Butterworths.
- [7] DONOVAN P.D. 1986, *Protection of metals from corrosion in storage and transit*, New York, Ellis Horwood limited/Wiley.
- [8] PAVLOGEORGATOS G. 2003, *Environmental parameters in museum buildings*, Building and Environment 38/2003, Elsevier, 1457-1462.
- [9] MACLEOD K.J. 1978, *Relative humidity: its importance, measurement and control in museums*, Technical Bulletin, Ottawa, Canadian Conservation Institute.
- [10] ASHRAE (2007) '*ASHRAE Handbook – HVAC Applications*', Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- [11] BERNARDI A. 2004, *Conservare le opere d'arte . Il microclima negli ambienti museali*, Le pleiadi, Ed. Il Prato.
- [12] ISO 7726, *Ergonomics of thermal environment – Instruments for measuring physical quantities*, Second Edition, 1st November 1998.
- [13] Bacci M. et al. 2003, *Disposable indicators for monitoring lighting conditions in museums*, Environ. Sci. Technol. 37/2003, 5687-5694.
- [14] La Gennusa M., Nicoletti F., Rizzo G., Scaccianoce G. 2005, *The control of indoor environment in heritage buildings: application of a methodology to an old Italian museum*, J. Cult. Herit. 6/2005, 147-155.
- [15] UNI 11120, Beni culturali – Misurazione in campo della temperatura dell'aria e della superficie dei manufatti. Milano: UNI – Ente Italiano di Unificazione, 2004.
- [16] UNI 10969, Beni culturali – Principi generali per la scelta e il controllo del microclima

- per la conservazione dei beni culturali in ambienti interni. Milano: UNI – Ente Italiano di Unificazione, 2002.
- [17] UNI 10829, Beni di interesse storico e artistico – Condizioni ambientali di conservazione – Misurazione ed analisi. Milano: UNI – Ente Italiano di Unificazione, 1999.
- [18] ISO 11799, Information and documentation – Document storage requirements for archive and library materials. Geneva: International Organization for Standardization, 2003.
- [19] ANSI/NISO Z39.79, Environmental Conditions for Exhibiting Library and Archival Materials. Bethesda: American National Standards Institute/National Information Standards Organization, 2001.
- [20] LA GENNUSA M., RIZZO G., RODONÒ G., SCACCIANOCE G., 2009, *People comfort and artwork saving in museums: comparing indoor requisites*, International Journal of Sustainable Design, 1/2009, 199-222.
- [21] LA GENNUSA M., LASCARI G., RIZZO G., SCACCIANOCE G. 2008, *Conflicting needs of the thermal indoor environment of museums: in search of a practical compromise*, Journal of Cultural Heritage 9/2008, 125-134.
- [22] ISA-S71.04, Environmental Conditions for Process Measurement and Control Systems: Airborne Contaminants, Instrument Society of America, Research Triangle Park, North Carolina, 1985.
- [23] SACCHI E. 1997, *La qualità dell'aria in edifici storico-museali. Una indagine su campo*, in *Microclima, qualità dell'aria e impianti negli Ambienti Museali*, Italy, Florence, 7 February, 1997, 39-65.
- [24] CAMUFFO D. et al. 1999, *Indoor air quality at the Correr Museum, Venice, Italy*, The Science of the Total Environment 236/1999, 135-152.
- [25] BAER N.S., BANKS P.N. 1985, *Indoor Air Pollution: Effects on Cultural and Historic Materials*, The International Journal of Museum Management and Curatorship 4/1985, 9-20.
- [26] BRIMBLECOMBE P., 1990, *The composition of museum atmospheres*, Atmospheric Environment 24, No. 1, 1-8.
- [27] UNI 10586 – 1997. Condizioni climatiche per ambienti di conservazione di documenti grafici e caratteristiche degli alloggiamenti. Milano: UNI – Ente Italiano di Unificazione.
- [28] DM 10/05/2001, 'Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei (art. 150, comma 6, D.L. n. 112/1998)', Ministero per i beni e le attività culturali, Gazzetta ufficiale Italiana 19/10/2001, n. 244, S.O.
- [29] DE SANTOLI L., MONCADA LO GIUDICE G. 1997, *Caratterizzazione e monitoraggio della qualità dell'aria negli ambienti museali*, Atti della Giornata Seminariale "Microclima, Qualità dell'Aria, e Impianti negli Ambienti Museali" dell'AICARR, Firenze, 7 febbraio.[1]
- [30] CEN, European PreStandard CR 1752 (1998), "Ventilation for Buildings – Design Criteria for the Indoor Environment".

- [31] PURAFIL INC., "Environmental Control for Museums, Libraries, and Archival Storage Areas", Technical Brochure 600 and latest edition 600A, Atlanta, Georgia (USA), 1993.
- [32] SACCHI E. 1998, *Il monitoraggio reattivo della qualità dell'aria negli ambienti museali. (Parte Prima)*, La Termotecnica, Ottobre e Novembre 1998, 89-96.
- [33] GUIDOBALDI F., PETRUCCI E., ROMANELLI, SCHIRRIPA SPAGNOLO G., DE SANTIS F., VALENTE T. 1995, *Nuovi sensori per la valutazione di indici di rischio per i monumenti in marmo esposti all'aperto*, Proceeding of 1th International Congress on: Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin, 27 November – 2 December 1995, Catania – Siracusa, Italy.
- [34] FERRO F. 2005, *Analisi in campo della qualità dell'aria di alcune sale del museo diocesano di Palermo – Applicazione della tecnica SPME supportata da gascromatografo e spettrometro di massa*, Thesis, University of Palermo.
- [35] ONGARATO S., PERCHIAZZI N., SERAGILLA R. 2004, *Microestrazione in fase solida*, in proceedings of the Conference of Solid Phase Micro Extraction, Padova, March 2004.
- [36] GROB H. 1993, *Classical Split and Splitless Injection in Capillary Gas Chromatography*, Hueting, Heidelberg, 1993.
- [37] VAS G., VEKEY K. 2004, *Solid Phase MicroExtraction: a powerful sample preparation tool prior to mass spectrometry journal of mass spectrometry*, J Mass Spectrom 39/2004, 233-54.

Descrizione ed impiego di alcuni metodi off-line per la caratterizzazione della qualità dell'aria nei musei

Parole chiave: qualità dell'aria, monitoraggio, sensori off-line per la qualità dell'aria, condizioni ambientali nei musei

1. Introduzione

Il microclima all'interno degli ambienti museali richiede particolare attenzione, soprattutto a causa dell'enorme varietà del tipo di opere d'arte esposte nei musei, dei differenti materiali con cui i beni culturali sono realizzati (che spaziano dalla pietra al marmo, dai tessuti al legno, etc.), e dell'importanza intrinseca di questi oggetti che, nella maggior parte dei casi, rappresentano esemplari d'arte unici.

È per questo che le condizioni microclimatiche da mantenere all'interno degli ambienti museali sono da tempo oggetto di studio e di ricerca. In letteratura è possibile reperire numerose indicazioni sulle condizioni microclimatiche ottimali da garantire all'interno di spazi museali chiusi, al fine di preservare le opere d'arte ivi contenute ed esposte [1-11], con particolare riguardo al deterioramento dei materiali. Questi requisiti si riferiscono essenzialmente ai parametri termo-igrometrici [12] ed ai parametri luminosi e visivi [13], che sono in genere facilmente monitorabili senza particolari interventi impiantistici negli spazi espositivi [14]. Vigono altresì diverse norme e standard tecnici che suggeriscono le condizioni microclimatiche opportune per gli ambienti museali [15-19].

Va però rilevato che nella maggior parte dei casi l'attenzione dei tecnici e dei curatori dei musei è rivolta alle condizioni ottimali per una corretta esposizione e per la conservazione delle opere d'arte, con poco riguardo al comfort dei visitatori e delle persone che lavorano in tali ambienti.

A tal proposito, recentemente alcuni studi hanno rivolto l'attenzione anche agli aspetti concernenti il comfort dei visitatori e delle persone che lavorano negli ambienti museali, ponendo in evidenza come, non dirado, i requisiti per la conservazione delle opere d'arte e quelli per il comfort delle persone sono fra loro in conflitto [20] e ricercando dei pratici compromessi tra tali contrastanti requisiti [21].

Ritornando al tema della conservazione delle opere d'arte, va osservato che il microclima degli ambienti museali gioca sicuramente un ruolo fondamentale nel processo di degradazione dei materiali, ma non può essere altresì trascurato il deterioramento delle opere d'arte provocato dai livelli di inquinamento dell'aria interna che, in particolare nelle aree urbane, possono facilmente raggiungere quelli dell'aria esterna, a maggior ragione nel caso in cui non vengano adottati opportuni sistemi di filtraggio dell'aria [22-24].

Si è detto che, nonostante i numerosi studi riguardanti le caratteristiche dell'aria interna nei musei, gli attuali standard tecnici appaiono ancora problematici da questo punto di vista. Infatti, non è ancora disponibile una lista definitiva dei valori raccomandati dei livelli di concentrazione massima degli inquinanti gassosi, e ciò costituisce un serio limite per i tecnici impegnati nel processo di monitoraggio e di controllo della qualità dell'aria all'interno dei musei, siano essi ventilati meccanicamente o naturalmente.

In Tabella 1 si riporta una selezione dei valori massimi permessi dei principali inquinanti nei musei, così come indicati nella letteratura di settore [3, 25-28]. Appare pertanto importante il ruolo del monitoraggio e della caratterizzazione delle condizioni indoor degli spazi espositivi e di conservazione dei beni culturali.

L'intento della caratterizzazione e del monitoraggio della qualità dell'aria all'interno di un ambiente chiuso è quello di rilevare gli inquinanti gassosi presenti nell'aria e, laddove possibile, di misurarne la concentrazione.

La differenza sostanziale fra le due operazioni consiste nel fatto che, mentre il monitoraggio rileva la concentrazione di un determinato inquinante (o di una classe di inquinanti) in modo continuo ed on-line, la caratterizzazione rivela se l'aria presente all'interno di un ambiente è più o meno dannosa, attraverso l'uso di sensori (principalmente di tipo chimico) generalmente off-line e offline. Nella Tabella 2 si riportano alcuni tipici metodi di monitoraggio e caratterizzazione dell'aria negli ambienti interni [29].

L'approccio sensoriale olfattivo umano può fornire informazioni utili per la caratterizzazione dell'aria solo da un punto di vista soggettivo. P.O. Fanger propose, a tal proposito, la metodologia contenuta nel documento tecnico CEN "Ventilation for Buildings – Design Criteria for the Indoor Environment" [30]. Tale metodologia tuttavia presenta diversi inconvenienti, tra i quali la composizione del campione di persone per il giudizio soggettivo, la correlazione con il comfort o con la salute degli occupanti, la correlazione del giudizio soggettivo con le grandezze oggettive.

L'approccio oggettivo consiste nella rilevazione in campo della concentrazione di un gas di riferimento. Il gas generalmente considerato è la CO₂ che, come è noto, è direttamente correlabile alla presenza umana negli ambienti in esame. Alle concentrazioni di questo gas sono state associate delle soglie di accettabilità e di sicurezza. Naturalmente questo metodo consente di correlare la qualità dell'aria principalmente con la presenza di persone all'interno dell'ambiente espositivo e non fornisce informazioni su altre potenziali fonti di inquinamento.

Occorre inoltre aggiungere che la strumentazione per la verifica dello stato di inquinamento dell'aria è generalmente ingombrante, caratteristica che mal si concilia con le esigenze dei progetti espositivi messi in atto nei musei, che si reggono quasi sempre su delicati equilibri estetici.

Per ovviare a questi problemi si può utilizzare un altro tipo di approccio, legato alla variazione di alcune caratteristiche fisico-chimiche di particolari lamine che, esposte nell'ambiente d'analizzare per un determinato lasso di tempo, forniscono informazioni sul livello di qualità dell'aria presente in quell'ambiente.

Anche questo approccio, del resto, presenta dei limiti: l'analisi infatti fornisce essenzialmente informazioni sul livello di aggressività dell'aria nei confronti di manufatti costituiti di materiali simili al materiale del provino; non viene effettuato un monitoraggio in continuo ed in tempo reale; si forniscono valutazioni di tipo prettamente qualitativo. Tuttavia, questo ultimo approccio è generalmente caratterizzato da un basso impatto estetico e da un più basso costo rispetto a quello oggettivo.

Sullo sfondo di questo contesto, nel presente lavoro vengono riportati i risultati di tre esperienze volte alla caratterizzazione della qualità dell'aria all'interno di un ambiente museale:

1. la prima riguarda la caratterizzazione dell'aria di alcune sale della Galleria Regionale della Sicilia (Palazzo Abatellis), a Palermo, effettuata mediante l'esposizione di lamine bimetalliche (Purafil[®]) di dimensioni molto ridotte, la cui originaria applicazione era stata proposta per ambienti industriali;
2. la seconda riguarda ancora la caratterizzazione dell'aria di alcune sale della Galleria Regionale della Sicilia, ma effettuata con l'esposizione di lastre di marmo (strisce di marmo);
3. la terza riguarda la caratterizzazione dell'aria di alcune sale del Museo Diocesano di Palermo, effettuata con fibre assorbenti (provini di fibre assorbenti). Questo metodo è stato precedentemente applicato ad ambienti di piccole dimensioni di destinazione non museale.

Le opere monitorate nelle suddette campagne di misura sono costituite, principalmente, dai materiali riportati in Tabella 3, dove inoltre vengono riportati i danni loro indotti da alcuni gas inquinanti.

2. Provini reattivi metallici

La prima campagna di misura sulla qualità dell'aria è stata effettuata grazie alla collocazione nelle sale espositive di provini bimetallici della Purafil inc'. [31].

Questa metodologia, proposta originariamente per ambienti industriali, è stata adottata per valutarne un suo possibile utilizzo anche nel controllo della qualità dell'aria degli ambienti interni dei musei.

2.1. Il principio fisico-chimico

L'approccio reattivo (o corrosivo) si fonda su un'impostazione abbastanza differente dai tradizionali approcci di misura in quanto, piuttosto che ricercare e misurare i gas inquinanti presenti nell'ambiente in studio, si concentra sulla verifica degli effetti di degrado che tali sostanze contaminanti possono produrre sull'opera d'arte [32]. È un metodo originariamente proposto per gli ambienti industriali ed applicato agli ambiti museali anche nel corso di una campagna nazionale di misure promossa dal Comitato Termotecnico Italiano con il coinvolgimento di alcuni dei più importanti musei del paese.

Il metodo si fonda sulla misura della reattività di due provini metallici (uno di rame ed uno d'argento) situati per un lungo periodo di tempo nello stesso ambiente in cui sono esposte le opere d'arte: la dimensione dello spessore dello strato dei prodotti di corrosione sulla superficie dei provini fornisce la misura dell'aggressività dell'aria.

La relazione tra la causa (gas inquinante) e l'effetto della corrosione del coupon è descritto dalla relazione [32]:

$$x = k \cdot t^n \quad (1)$$

in cui x rappresenta lo spessore dello strato dei prodotti della corrosione (generalmente misurato in Å) intervenuta dopo il tempo t d'esposizione ed n è un esponente, di valore minore o uguale di uno, che è legato alla costante di proporzionalità k , ma che è anche dipendente dal valore x . A parità di cause d'e-

sposizione e per analisi comparate la costante di proporzionalità non ha più alcuna influenza, mentre la funzione $n(x)$ si assume pari a 0,3 (inquinamento leggero), 0,5 (inquinamento moderato) o 1 (inquinamento pesante o severo) in base al livello di aggressività dell'aria in esame come suggerito dalla Norma ISA [22] per ambienti industriali.

Sono stati proposti diversi metodi di classificazione ambientale fondati sull'approccio corrosivo per la conservazione dei beni storico-artistici. Rifiutando di utilizzare la classificazione proposta dalla Norma ISA perché riferita all'aggressività dell'aria in ambienti industriali, si può utilizzare la classificazione proposta dalla società Purafil inc.' [31], che ha prodotto e resi disponibili i provini utilizzati per le prove qui descritte. Quest'ultima classificazione prevede cinque categorie di qualità dell'aria, con differenti valori della corrosione di soglia per il rame e per l'argento, come illustrato nella Tabella 4, per un periodo previsto di esposizione di 30 giorni. La differenza di 50 Å tra i valori soglia della lamina di rame e della lamina di argento è imputabile alla formazione nella lamina di rame di uno spessore di ossido pari a 50 Å già nella fase di fabbricazione.

Va infine segnalato che un gruppo di studio del Comitato Termotecnico Italiano ha proposto la classificazione semplificata riportata in Tabella 5, basata esclusivamente sulle soglie di attenzione e di pericolo per ciascun provino.

2.2. Il monitoraggio

Nel periodo compreso fra il settembre ed il novembre 1997 è stato condotto uno studio ambientale sul campo, presso la Galleria Regionale della Sicilia ("Palazzo Abatellis") volto alla verifica della qualità dell'aria indoor in alcuni spazi espositivi rappresentativi del museo e che si collocava in un più vasto programma di monitoraggio ambientale della galleria. In ragione della loro importanza (e dunque dell'interesse a preservarle dal degrado) sono state selezionate tre fondamentali opere esposte nel museo: l'Annunziata di Antonello da Messina, il grande affresco "Il Trionfo della Morte" e l'anfora denominata "Vaso Malaga".

Utilizzando come supporto dei piccoli telai in legno, allo scopo progettati e realizzati dal personale del museo, sono stati collocati quattro provini bimetallici reattivi nelle tre sale (vedi Figura 1 a colori, p. 232): nella sala dell'Annunziata, oltre al coupon applicato alla parete, è stato collocato un ulteriore coupon all'interno della teca contenente il dipinto, allo scopo di evidenziare le eventuali differenze di qualità dell'aria tra la sala e l'ambiente effettivamente a contatto con l'opera d'arte.

È importante sottolineare che le condizioni microclimatiche generali del museo non erano certamente ottimali: le opere esposte sono infatti soggette agli sbalzi climatici esterni a causa dell'assenza di un impianto di climatizzazione, anche se gli effetti negativi sono certamente mitigati dalla grande inerzia termica dell'involucro dell'edificio, che smorza e trasla temporalmente l'onda termica esterna. Inoltre, il vaso Malaga, situato in un porticato annesso all'edificio, era sostanzialmente sottoposto alle condizioni termoisometriche esterne, fatta salva la protezione dalla pioggia.

Più in generale è opportuno rimarcare come la città di Palermo sia soggetta ad un forte inquinamento principalmente prodotto dai mezzi di trasporto in ambito urbano; la vicinanza del museo al mare, se pur contribuisce a mitigare tali effetti inquinanti, ne determina altri, caratteristici dei climi marini.

La metodologia reattiva qui presentata, pur consentendo un monitoraggio a basso impatto ambientale, che ne costituisce indubbiamente un vantaggio, presenta dei limiti che devono essere tenuti presenti. Il metodo è particolarmente adatto a rilevare la presenza di sostanze aggressive per i metalli piuttosto che per i materiali lapidei e le pitture; esso, inoltre, pone in relazione in modo empirico il fenomeno di corrosione, cui sono soggetti i due metalli test, con l'aggressività di un ambiente.

2.3. Risultati ottenuti

I risultati delle analisi condotte (presentati sottoforma di scheda, un esempio

delle quali è riportato in Figura 2) nelle sale espositive delle tre opere citate sono sintetizzati nei grafici mostrati in Figura 3 a colori, p. 232, che riportano gli spessori della corrosione per le lamine di rame (a sinistra) e quelli per le lamine d'argento (a destra). Nei grafici sono altresì evidenziate con linee orizzontali le classi di purezza dell'aria secondo la classificazione della Purafil Inc.TM. Seguendo la classificazione proposta dal CTI occorre invece riferirsi alle sole classi C4 (soglia di attenzione) e C5 (soglia di pericolo).

I coupon contrassegnati con i numeri 1, 2 e 3 si riferiscono rispettivamente alla sala dell'Annunziata, alla teca contenente il dipinto ed alla sala del Trionfo della Morte (provini esposti per tre mesi); i coupon contrassegnati dai numeri 4, 5 e 6 si riferiscono tutti al Vaso Malaga (provini esposti per un mese ciascuno).

Le considerazioni più immediate che possono essere tratte da questa prima analisi portano ad affermare che, almeno per la situazione climatica e di inquinamento ambientale del periodo considerato, le condizioni di purezza dell'aria delle sale interne sono accettabili, anche se non del tutto soddisfacenti. Inoltre, appare evidente l'effetto protettivo della teca che racchiude l'Annunziata sulla lamina in argento. La situazione climatica alla quale è sottoposta l'anfora, costantemente oltre la soglia di pericolo, è invece molto preoccupante ed indica la necessità di un intervento di mitigazione ambientale.

3. Provini di marmo

La seconda campagna di misura sulla qualità dell'aria è stata intrapresa facendo ricorso alla collocazione di sensori costituiti da lastre di marmo.

La validazione di tale metodologia di indagine rientrava in un programma di ricerche del Centro CNR "Conservazione Opere d'Arte" di Roma. Questo programma prevedeva l'individuazione di indici di rischio che consentano di valutare l'aggressività di un certo ambiente reale rispetto ad un altro (scelto come riferimento) per un dato tipo di materiale di cui si compone l'opera d'arte.

3.1. Principio fisico

L'analisi consiste nell'esporre alcune lastre di marmo all'aggressività dell'aria contenuta all'interno di un ambiente museale per un prefissato periodo di tempo; pertanto, queste lastre fungono da sensori off-line per la valutazione della qualità dell'aria di un ambiente. Il loro spessore deve essere piccolo e paragonabile a quello dell'opera d'arte che viene interessato normalmente dall'aggressività dell'aria.

Le analisi, da eseguirsi sui fragilissimi sensori di marmo, sono di tipo fisico, cioè tendenti a valutare il degrado meccanico del marmo dopo un certo tempo di esposizione.

Anche le analisi di tipo chimico erano state inizialmente prese in considerazione, ma è stato osservato che esse poco contribuivano alla ricerca di un indicatore globale della qualità dell'aria, e per tal motivo sono state tralasciate [33].

La proprietà meccanica, assunta quale indice globale di valutazione della qualità dell'aria, è la durezza, ovvero la resistenza che un materiale oppone alla penetrazione di un corpo molto duro. Il metodo adottato per la misura della durezza è il metodo Vickers ($HV_{0,2}$). Questo consiste nell'incidere la superficie delle lastre di marmo (sensori) con un penetratore di forma piramidale a base quadrata e angolo al vertice di 136° , sotto un carico di prova nominale di $F = 1,961 \text{ N}$ (200g [33]); viene poi misurata la diagonale, d , dell'impronta lasciata dal penetratore tramite un microscopio con un ingrandimento 400x. Dal valore di tale diagonale si risale al valore di durezza $HV_{0,2}$ attraverso la seguente espressione:

$$HV_{0,2} = 1854 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (3)$$

Ovviamente è opportuno eseguire diverse misure della durezza per ogni lastra di marmo dalle quali si prende il valore medio quale valore di durezza. Inoltre, prima di eseguire le prove di durezza, le lastre devono essere sottoposte a lappatura in condizioni standardizzate.

3.2. Il monitoraggio

La metodologia di indagine illustrata è stata applicata alle stesse sale espositive della Galleria Regionale della Sicilia ("Palazzo Abatellis") dove sono state svolte le indagini con i provini metallici della Purafil[®], ovvero nelle sale dove sono esposte l'Annunziata di Antonello da Messina, il grande affresco "Il Trionfo della Morte" e l'anfora denominata "Vaso Malaga", con l'aggiunta della scultura "Madonna della Neve".

I provini di marmo sono stati installati all'interno delle sale anzidette il 14 luglio 2001. Per l'installazione di tali sensori, aventi basso impatto visivo, sono stati costruiti dei supporti in plexiglass così come mostrati in Figura 4.

Dopo un periodo di sei mesi circa (il 24 gennaio 2002) i provini di marmo sono stati prelevati ed inviati direttamente al CNR "Conservazione Opere d'Arte" di Roma, dove sono state eseguite le prove di durezza precedentemente descritte.

I risultati scaturiti da tali prove sono riportati nella Tabella 6, dove si indica altresì lo scostamento $DHV_{0,2}$ rispetto alla microdurezza del provino bianco.

3.3. Risultati ottenuti

I risultati ottenuti da tale tipo di analisi non sono in grado di fornire, allo stato attuale, informazioni definitive, poiché non è ancora disponibile una scala interpretativa oggettiva (maschera di lettura); il CNR di Roma si sta occupando di individuare questa maschera a partire dal confronto dei risultati ottenuti nelle varie campagne di misura condotte in diversi musei italiani.

Se volessimo invece confrontare qualitativamente i risultati ottenuti tramite le lastrine di marmo con quelli ottenuti con i provini metallici della Purafil[®], prendendo come riferimento i valori ottenuti nella sala espositiva dell'anfora denominata "Vaso Malaga", si constatarebbe che i risultati ottenuti sono concordi con quelli rilevati tramite le lamine della Purafil Inc.TM come mostrato in Figura 6 a colori, p. 232.

Infatti, l'analisi comparativa dei risultati mostra che l'inquinamento cui è soggetto il vaso Malaga, rilevato con le lastrine di marmo, risulta superiore a quello del Trionfo della Morte e dell'Annunziata. In sostanza, seppure a livello qualitativo i provini di marmo restituiscono informazioni coerenti con quelle fornite dai provini metallici.

4. Provini di fibre assorbenti

La terza campagna di caratterizzazione della qualità dell'aria è stata eseguita all'interno del museo Diocesano di Palermo [34] attraverso l'uso di provini di fibre assorbenti. Più precisamente, tale campagna aveva l'obiettivo di rilevare, all'interno di alcune sale espositive, la presenza di Composti Organici Volatili (VOC) avvalendosi di particolari fibre assorbenti, al fine di valutare prevalentemente la presenza di benzene o di idrocarburi clorurati, particolarmente dannosi anche per l'organismo umano.

Lo studio è stato eseguito all'interno di due sale del museo denominate sala VIII e sala XII.

4.1. Il principio fisico

La tecnica utilizzata, denominata SPME (Solid Phase Micro Extraction) ed ormai divenuta semplice ed economica, si fonda su di un metodo di estrazione del campione, che è in grado di rilevare livelli anche molto bassi di composti organici. La tecnica SPME si basa sul principio chimico-fisico della ripartizione dell'analita tra la fase solida che ricopre la fibra di silicio e la fase gassosa del campione in esame.

Mediante questa tecnica si opera l'estrazione e la concentrazione di composti organici vari senza fare uso di solventi, con evidenti vantaggi dal punto di vista della sicurezza e della salute degli analisti, e senza l'impiego continuo di strumentazioni costose e sofisticate, con un netto vantaggio economico [35].

Il provino da utilizzare per l'applicazione della tecnica SPME è composto da una fibra di silicio fuso (materiale molto assorbente che permette di "cettare"

sostanze con un vasto range di polarità), generalmente di 1 cm in lunghezza e con diametro di 100 μm , ricoperto da materiale polimerico adsorbente (polimero di carbone poroso).

Le fibre sono disponibili con diverse fasi stazionarie, ed i vari ricoprimenti possono avere spessori variabili. Il differente spessore permette di assorbire quantità diverse di analita sulla superficie polimerica.

I principali vantaggi che questa tecnica può offrire sono i seguenti [36] [37]:

- ✓ riduzione fino al 70% dei tempi di preparazione dei campioni; nessun impiego di solventi;
- ✓ possibilità di riutilizzo della fibra fino a più di 100 estrazioni, con un evidente vantaggio economico;
- ✓ versatilità del sistema, che può essere interfacciato a tutti i metodi GC (gascromatografo);
- ✓ possibilità di automatizzazione delle operazioni.

4.2. Il monitoraggio [34]

Il monitoraggio è composto di due fasi: nella prima fase avviene l'adsorbimento dei gas che si trovano all'interno della sala oggetto di studio, mentre nella seconda fase si ha il desorbimento degli analiti concentrati nella fibra (fase interamente svolta in un laboratorio chimico). Questa seconda fase si basa principalmente sull'utilizzo di un gascromatografo (GC), che separa le specie che compongono una miscela, accoppiato ad uno spettrometro di massa (MS), che individua e identifica i vari composti volatili.

Nel caso studio è stata utilizzata la fibra di carboxen/PDMS (polidimetilsilossano), con spessore del rivestimento di 85 μm , ritenuta la più adatta nell'adsorbimento dei VOCs di interesse. Per facilitarne l'esposizione agli inquinanti presenti nell'aria della sala espositiva è stato costruito un supporto leggero e protettivo, a forma di parallelepipedo, in plexiglas con basi quadrate di 8 cm e altezza di 12 cm, come mostrato nella Figura 5 a colori, p. 232. È stato stabilito di assumere un tempo di esposizione di 24 ore, alla fine del quale la fibra è stata isolata dall'aria contaminata tramite un vial con capacità di 5 ml in vetro chiaro, con tappo a vite munito di guarnizione teflonata. Durante il trasporto in laboratorio, tutto il sistema siringa-fibra-vial è stato inserito in una borsa termica a temperatura molto bassa al fine di isolare termicamente il campione.

Nella sala XII la sonda è stata posizionata su una base posta al centro dell'ambiente mentre nella sala VIII la sonda è stata posizionata (nella stessa ora) davanti la tribuna marmorea del Gagini, ubicata vicino al muro perimetrale della sala stessa (Figura 6 a colori, p. 232).

Nel laboratorio le fibre sono state analizzate attraverso l'utilizzo di un gascromatografo modello GC-17 A, accoppiato col detector a spettrometria di massa modello QP5000, entrambi della SHIMADZU™ company.

Per individuare e distinguere la presenza di sostanze volatili organiche nelle due sale del museo, sono stati interpretati i vari cromatogrammi ottenuti dal sistema CG-MS.

Tra i diversi metodi utilizzabili per l'individuazione dei gas adsorbiti dalla fibra, ne sono stati qui scelti due: il primo basato sulla comparazione dei tempi di ritenzione rilevati dal cromatogramma con i dati di letteratura e il secondo basato sul confronto tra lo spettro di massa delle sostanze con quelli di letteratura. Le condizioni operative e le caratteristiche strumentali sono riassunte nella Tabella 7.

Il programma delle temperature è stato determinato sperimentalmente (aumento di temperatura di 8°C al minuto) al fine di ottenere una buona separazione dei composti contenuti nel campione e quindi cromatogrammi con picchi ben definiti e possibilmente non sovrapposti.

Il secondo metodo è stato utilizzato come conferma del corretto riconoscimento della particolare sostanza. Esso si basa sull'impiego dello spettrometro di massa, che viene collegato direttamente al gascromatografo, il quale registrando lo spettro di massa degli ioni caratteristici, univoco per ogni specie chimica, permette l'individuazione della sostanza.

Tenendo presente che un cromatogramma riproduce in ascissa la scala temporale dei tempi di ritenzione, sono stati studiati i diagrammi delle due sale (Figure 7 e 8 a colori, p. 233).

I due cromatogrammi hanno evidenziato la presenza in entrambe le sale di tracce di vari idrocarburi e, nello specifico, di benzene, di toluene, del 1,2-dicloropropano e del 1,2-dimetilbenzene.

Nella Tabella 8 sono stati riportati i principali risultati ottenuti, ovvero le principali sostanze individuate ed il rispettivo tempo di ritenzione.

Dall'esame degli altri picchi si è indotti a supporre anche la probabile presenza di un elevato numero di idrocarburi lineari saturi e di composti volatili quali aldeidi e alcoli a basso peso molecolare.

Sono stati infine utilizzati gli spettri di massa per avere un'ulteriore conferma della validità dei risultati ottenuti.

4.3. Risultati ottenuti

Fra i risultati ottenuti con la metodologia qui descritta si può annoverare il suo stesso impiego. Come detto, infatti, per esaminare le caratteristiche qualitative dell'aria all'interno del museo Diocesano di Palermo è stata utilizzata un'innovativa metodologia di adsorbimento dei gas volatili, la tecnica SPME, ordinaria in altri contesti (in ambienti più piccoli e contenuti), ma ancora poco utilizzata per questo tipo di ambienti, di grandi dimensioni e destinato sia alla fruibilità che alla conservazione delle opere d'arte.

La campagna di misure ha avuto come principale risultato la verifica della possibile applicazione di questa metodologia per la valutazione della qualità dell'aria in ambienti museali; infatti, essa ha permesso di rilevare la presenza di alcuni inquinanti nell'aria, ma non la loro quantità. Quest'aspetto, che dovrebbe essere argomento di una successiva campagna di misure, dovrebbe essere valutato studiando la proprietà di adsorbimento di queste tipologie di fibre.

5. Conclusioni e discussione

In conclusione, attraverso le campagne di misura qui svolte applicando diverse metodologie, si può affermare che per quanto riguarda Palazzo Abatellis, almeno con riferimento alla qualità dell'aria nel periodo considerato, le condizioni di purezza della stessa all'interno delle sale oggetto dell'indagine sono accettabili, ad eccezione della sala dove è ubicata l'anfora Malaga, a causa delle particolari condizioni ambientali alle quali è soggetta e che pertanto richiede certamente un intervento correttivo.

Per quanto riguarda la campagna con i provini di marmo manca attualmente, come già rilevato, una scala di riferimento, quindi poco si può dire in termini assoluti sui risultati ottenuti. Tuttavia, il confronto indiretto con altri provini esposti in altri musei italiani, ha fornito un'indicazione generale sullo stato ambientale nei confronti dei materiali lapidei esposti nella galleria. Secondo tale giudizio qualitativo apparirebbe che la qualità dell'aria all'interno delle stanze del museo risulti "mediamente" inquinata. E comunque, i risultati ottenuti sono concordi con quelli ottenuti tramite i provini della Purafil Inc.TM.

Per quanto attiene la campagna eseguita con l'applicazione della tecnica SPME, svolta presso il museo Diocesano di Palermo, questa ha permesso di verificare l'idoneità della tecnica della microestrazione di fase solida (precedentemente impiegata in ambienti più raccolti) quale utile metodo per una valutazione preventiva delle sostanze volatili organiche presenti in ambienti museali. Essa è inoltre poco invasiva nei confronti delle condizioni espositive delle opere dal momento che si basa sulla collocazione in situ di fibre di diverso spessore e polarità per effettuare campionamenti selettivi in funzione dei pesi molecolari, delle volatilità e delle polarità degli analiti in esame. La tecnica SPME ha permesso di rilevare nelle sale analizzate tracce di varie sostanze organiche come il benzene, il toluene e altri idrocarburi (1,2 dimetilbenzene, e 1,2 dicloropropano) dannosi sia per le opere d'arte esposte, poiché possono contribuire alla formazione di acidi aggressivi nei confronti degli oggetti, che per l'organismo umano.

Vista la crescente necessità di ottenere risultati analitici con metodi semplici, veloci, economici ed agevoli, quest'ultima tecnica si prefigura nel campo dell'analisi delle tracce organiche come una delle più innovative e con maggiori possibilità di applicazioni future.

Ovviamente, i principali interventi per il miglioramento della qualità dell'aria riguardano le soluzioni impiantistiche e, pertanto, occorre tenere ben presente le importanti peculiarità degli ambienti museali: da un lato infatti, qualunque intervento rischia di compromettere l'armonia espositiva, spesso faticosamente raggiunta, dall'altro lato lo stesso edificio che ospita il museo rappresenta in sé un bene culturale da preservare e per il quale gli interventi impiantistici possono essere immaginati e proposti solo con estrema cautela.

È su questo fronte, a valle delle azioni conoscitive realizzate mediante gli interventi di monitoraggio qui descritti, che occorre certamente rivolgere l'attenzione, alla ricerca di componenti di impianto che, pur permettendo agli ambienti museali di raggiungere e mantenere le condizioni microclimatiche ottimali, non ne pregiudichino l'armonia espositiva.

Summary

This paper will examine three methodologies deployed in off-line research relating to air quality in museums. These methodologies made use of sensors based on the different chemical-physical properties of various materials (corrosiveness, hardness and absorption). Various field applications were applied to case studies, which were performed in two museums in Palermo, Italy: the Regional Gallery of Palazzo Abatellis and the Diocesan Museum. This review of methodologies and sensors examines which protocol should be put into practice in museums in monitoring the air quality of display spaces and the conservation of cultural artefacts.

Riassunto

In questo lavoro si passano in rassegna tre metodologie per l'indagine off-line della qualità dell'aria all'interno dei musei, che utilizzano sensori basati su differenti proprietà chimico-fisiche (corrosività, durezza e assorbenza) di alcuni materiali. Sono state effettuate alcune applicazioni in campo in due musei palermitani, la Galleria Regionale di Palazzo Abatellis e il museo Diocesano di Palermo. Questa rassegna e la diretta applicazione delle metodologie e dei sensori confermano il problema ancora aperto sul protocollo da attuare all'interno dei musei per monitorare lo stato dell'aria degli ambienti espositivi e di conservazione dei beni culturali.

Résumé

Dans ce travail on passe en revue trois méthodologies pour l'étude off-line de la qualité de l'air à l'intérieur des musées, qui utilisent des capteurs basés sur des propriétés chimico-physiques différentes (corrosivité, dureté et absorbance) de certains matériaux. Certaines applications ont été effectuées sur le terrain dans deux musées palermitains, la Galerie Régionale du Palais Abatellis et le Musée Diocésain de Palerme. Cette revue et la directe application des méthodologies et des capteurs confirment le problème encore ouvert sur le protocole à réaliser à l'intérieur des musées pour monitorer l'état de l'air des espaces d'exposition et de conservation des biens culturels.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden drei Verfahren zur Offline-Untersuchung der Luftqualität in Museen untersucht, bei denen Sensoren benutzt werden, die auf den unterschiedlichen chemisch-physikalischen Eigenschaften (Korrosivität, Härte und Wasseraufnahmevermögen) mancher Materialien beruhen.

Es wurden einige Feldanwendungen in zwei palermitanischen Museen durchgeführt, in der Galleria Regionale im Palazzo Abatellis und im Diözesanmuseum von Palermo. Diese Untersuchung und die direkte Anwendung der Verfahren und Sensoren bestätigen das immer noch ungelöste Problem des in den Museen zu anzuwendenden Protokolls zur Überwachung des Zustands der Luft in den Ausstellungs- und Aufbewahrungsräumen für Kulturgüter.

Resumen

En este trabajo se hace una reseña de tres métodos para el estudio *off line* de la calidad del aire en el interior de los museos, que utilizan sensores basados en distintas propiedades químico-físicas (corrosividad, dureza y absorbencia) de algunos materiales. Se han efectuado algunas aplicaciones en campo, en dos museos de Palermo, la Galería Regional de Palazzo Abatellis y el museo Diocesano de Palermo. Esta reseña y la aplicación directa de las metodologías y de los sensores confirman el problema, aún vigente, del protocolo a implementar dentro de los museos para monitorizar el estado del aire de los ambientes expositivos y de conservación de los bienes culturales.

Резюме

В этой работе проводится обзор трех методов для исследования *off-line* качества воздуха внутри музеев, в которых используются датчики, работающие на принципе различных химически-физических свойств (корродируемость, твердость и поглотительная способность) некоторых материалов. Внедрены некоторые конкретные применения в двух музеях города Палермо: Областной Галерее Дворца Абателлис и Епархиальном музее Палермо. Этот обзор и прямое применение такой методологии и датчиков подтверждают, что продлжает оставаться открытой проблема протокола, который следует применять в музейных помещениях для мониторинга состояния воздуха в выставочных помещениях и хранения культурного имущества.