

# MICROCLIMATE MANAGEMENT FOR THE PRESERVATION OF CULTURAL HERITAGE

**Salvatore Alterio**

Facoltà di Architettura, Università degli Studi di Palermo

**Salvatore Barbaro**

Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Palermo

**F.sco Claudio Campione\***

Facoltà di Architettura, C.U.P.A., Agrigento

**Amanda Campodonico**

Dottoranda in Tecnologie per la Sostenibilità ed il Risanamento Ambientale

**Elisa Nicastri**

Architetto

*Keywords:* microclimate, cultural heritage, radiant floor heating and cooling system

## 1. Micro-climate control in museums

In recent years, the control of the micro-climate in museum environments has assumed a role of great importance in the protection of works of art, as it has been recognized as one of the causes of the degradation processes of materials or constituent parts of objects belonging to *cultural heritage* in general.

An artefact of historical, artistic and cultural value cannot be isolated from the surrounding environment with its microclimate; together they form a physical system that interacts and evolves through time.

The process of degradation, can be defined as a progressive and cumulative process of materials, that respond differently to the values given by environmental variables and their changes, both in a temporal and spatial way. Rapid temporal changes (or strong spatial gradients) in temperature and/or relative humidity, or exchanges of heat and mass of course, cause internal stress in many materials with irreversible and cumulative effects that accelerate the deterioration process.

---

\* Corresponding author: e-mail [ecologia2006@libero.it](mailto:ecologia2006@libero.it)

The past history of each object must be examined during which time the micro-climate has produced a consolidation of the material relative to its physical-chemical properties.

Hence the need to monitor environmental parameters, as any disturbance in the environment contributes in accelerating the process of degradation [1].

For this reason it was decided to work on two case studies, and show how nowadays, the use of new technologies for the control of thermal comfort in indoor environments is neglected.

The environmental variables in two case studies were examined: the medieval castle of Chiaramonte in Favara (Agrigento-Appendix 1) (see colour Figure 1, p. 211), and Saint Matthew's Church (Palermo-Appendix 2) (see colour Figure 2, p. 212).

Therefore, in both studies, careful monitoring of the micro-climate was carried out, identified mainly through the conditions of temperature and humidity to which the artefacts are exposed daily, with the aim of realizing their appropriate conservation [2].

**2. Thermodynamic control of the building-envelope**

A building, in general, can be considered as a thermo-physical system that affects different scientific competences. The aim is to maintain certain conditions in the indoor microclimate: a key role in this respect is the relationship between building and heating, and ventilation and air conditioning, whose interaction is responsible for achieving ideal conditions (Figure 3).

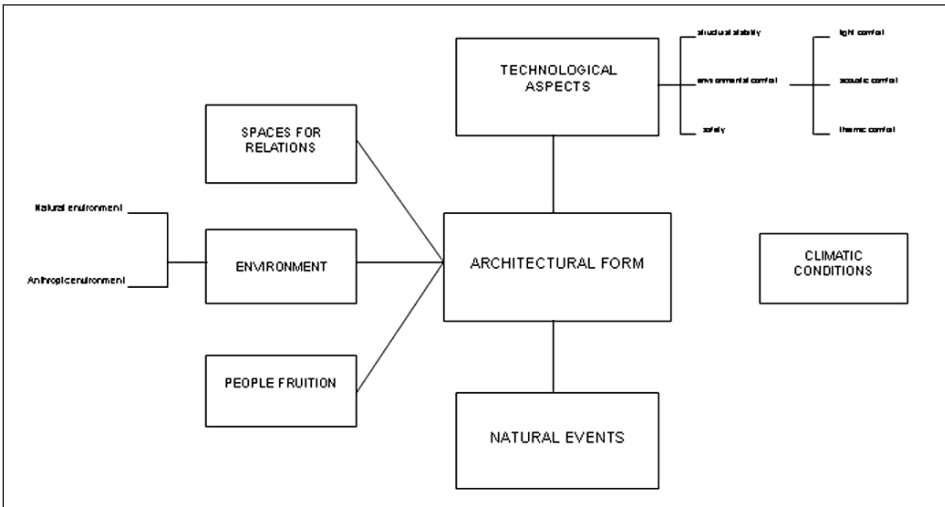


Figure 3. Interaction between environmental agents and factors.

Considering that most Italian museums are found in historic buildings, for which there is no precise knowledge as regards the exact construction and heating and cooling systems, one can imagine how difficult it is to study and implement control measures to ensure a smooth and constant micro-climate to protect the works of art together with everything housed inside the building. The problem is in being aware that museum objects require different micro-climatic conditions and that these conditions are not always compatible with the comfort of visitors and the staff of the museum. It is clearly impossible to have a system of heating/cooling for each work, except in rare cases of artefacts with a particular value and of historical-artistic uniqueness [3].

### **3. Micro-climate and exhibition environment**

For an exact assessment, a preliminary analysis was necessary, which took into consideration:

- an evaluation of the condition of the works of art to be examined;
- a study of the evolution of micro-climatic parameters and indoor air quality of the environment where the works of art are located;
- an overall judgment of evaluation of the system: artefact/environment;

The microclimate is understood as being a synthesis of the natural environmental conditions due not only to weather variables such as temperature (T, °C), humidity (U,%), solar radiation and wind, but also to thermal exchanges with other bodies such as infrared radiation, heating and ventilation, over a period of time, representative of all conditions resulting from natural and anthropic factors. This phase of analysis was preliminary to the subsequent design for the heating and cooling system.

### **4. The optimum micro-climate for conservation**

A historical work of art, that has adapted to environmental conditions and has found a “right balance”, would suffer some kind of “stress” if placed in conditions other than its original ones, precisely because of its inability to adapt to a new microclimate<sup>1</sup>. For this reason it is necessary to possess thorough knowledge of the past conditions of conservation regarding the artefact. All sudden changes in micro-climatic parameters including daily cycles can produce a risk for the work of art.

The seasonal cycles, being slower, are less harmful, and create conditions of equilibrium between the materials and the environment, and between the outer and inner parts. These are generally the environmental conditions in which a change in relative humidity (RH) leads to the lowest possible variation in the water vapour absorbed.

Table 1. Groups of materials sensitive to *T* and *RH* (UNI 10829).

Group A	<b>Materials that require extremely stable conditions of relative humidity</b> inlaid furniture, gilded or lacquered furniture, wooden musical instruments, oil paintings on panels or wood carvings, illuminated manuscripts (paper and parchment), oriental lacquer, plaster, Japanese screens
Group B	<b>Materials that require moderately stable conditions of relative humidity</b> costumes and cloths, oil paintings on canvas, art works and documents on paper and parchment, <i>papier maché</i> , materials of plant origin (bark, grass, papyrus), wooden polychrome objects, wooden furniture, objects and garments made of leather and skin, armour, weapons, materials in bone, ivory and horn, miniatures, Chinese lacquered objects
Group C	<b>Materials relatively insensitive to changes in relative humidity</b> stone, marble, ceramics, stable glass, silver and gold alloys
Group D	<b>Materials that require dry conditions</b> iron, steel, brass, bronze, copper and its alloys, lead, tin and its alloys, common silver, common gold, archaeological bronzes, unstable and iridescent glass, textiles with metallic elements, mummified exhibits
Group E	<b>Materials that require low temperature conditions</b> fur, animal skins, animal exhibits (birds and mammals)

However to maintain conditions constant it is better to choose *RH* values as close as possible to the natural ones<sup>2</sup>. Table 1 shows those groups sensitive to temperature and moisture relevant to a number of materials and museum objects present in our case studies.

##### 5. Microclimatic analysis of the Castle of Chiaramonte in Favara (Ag)

In the first place, microclimate monitoring aims to identify all interactions between external and internal temperature. Secondly, it aims to identify the reaction of the wall structure and interior surfaces to the heat load induced by the presence of latent and sensitive heat sources such as heating, natural lighting, artificial lighting and visitors. Figures 4 and 5 (see colour Figure 4, p. 212; Figure 5, p. 213) show the interior of the exhibition hall and conference room.

From the microclimatic analysis it is evident that the values of temperature (°C) and relative humidity (%) deviate from the optimal values for which it was considered appropriate to propose a radiant floor heating and cooling system with primary air supplied by an air-water heat pump, both on the ground floor and the first floor (the paving on all floors is made of baked clay bricks). Figure 6 (p. 213) shows the plans for the radiant

floor heating and cooling system integrated with primary air on the ground floor and the *piano nobile* floor.

To more clearly illustrate the thermal behaviour of the building when subjected to external thermal stress, Figure 7 (see colour Figure 7a, b, c, d, e, and f, p. 214) shows a simulation of the radiant floor heating and cooling system in the summer and winter seasons.

## 6. Microclimatic monitoring in Saint Matthew's Church in Palermo

The temporal-spatial measurements of temperature and relative humidity inside the Church were conducted in accordance with the procedure established by relevant legislation. A grid (see colour Figure 8, p. 214) was adopted and placed inside the Church, measuring 3×3 m. It was positioned at a height of 5 m above the floor and using a mobile instrument, known as Babuc/M, readings were taken of the temperature and relative humidity in various chosen points (see colour Figures 9 and 10, p. 215).

The typology of the materials constituting the collection in the Church of Saint Matthew were also identified (see colour Figure 11, p. 216). The measurements were taken in a time lapse ranging from 23 January to 5 June 2007. The resulting data from one of the ten chapels, namely the "Chapel of the Guardian Angel", were examined (see colour Figure 12, p. 216).

This picture, depicting the "Guardian Angel" is an eighteenth century oil on canvas (280×180 cm), by an unknown artist and is oriented towards the south-west of the building. It belongs to the category of objects and materials of organic nature, as expressly stated by the norm UNI 10829, since it is an oil painting on canvas. Of all the paintings in the Church, it is the most degraded and shows alterations in color, with cracks and exfoliation. These are due to rapid changes in RH which determine particularly harmful conditions of stress affecting the more superficial layers of the artefact. Paintings for example, respond immediately to external thermal stress.

The following are the readings (see colour Figure 13a, b, c, d, p. 217-218) for temperature and relative humidity in the above-mentioned period from January to June.

As shown by the figures above, the values reported differ significantly from the optimum conditions Figure 14a, b and thus it has proved necessary to provide a radiant floor heating and cooling system with primary air for the achievement of thermal comfort. This choice was made following a careful analysis of the paving inside the Church of St. Matthew and the result is shown in the following plan and photographic documentation (Figure 15 and see colour Figure 16a, b, c, d, p. 219).

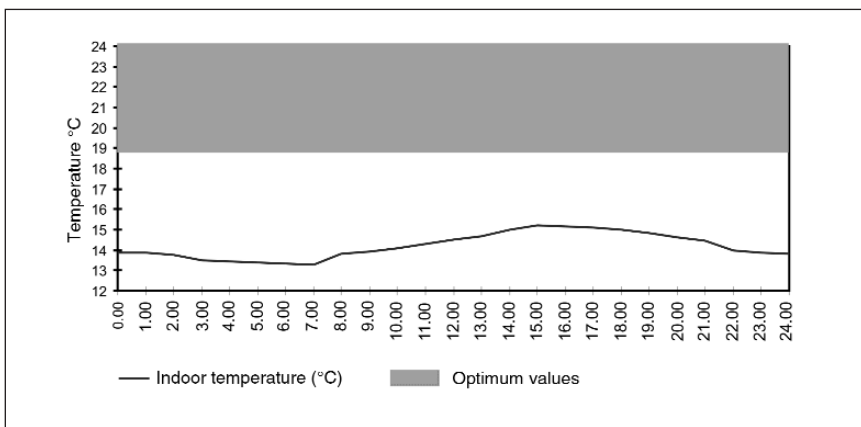


Figure 14a. Mapping n. 1, Chapel of the “Guardian Angel” – 23 January 2007 – Verification of optimum conditions.

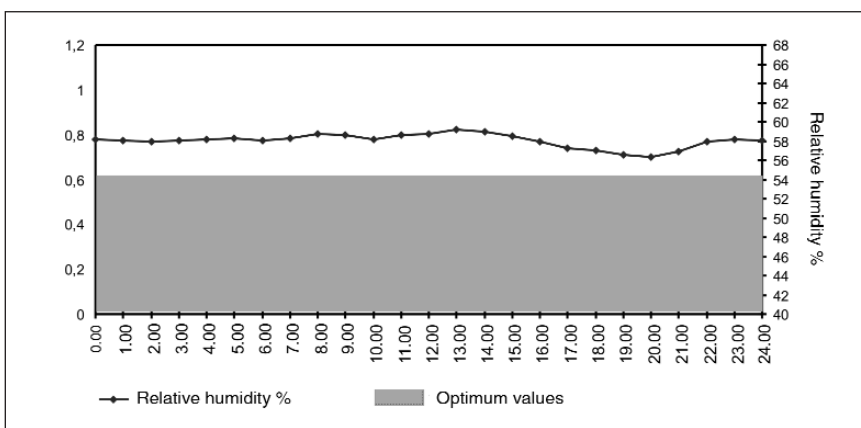


Figure 14b. Mapping n. 1, Chapel of the “Guardian Angel” – 23 January 2007 – Verification of optimum conditions.

The layout for the radiant floor heating, cooling system and the primary air supplied from the air-water heat pump, and a detailed section for the realization of a radiant floor system design is shown below (see colour Figures 17, 18, p. 220, and Figure 19).

## 7. Heating and cooling systems in Italian museums

In 56% of Italian museums, displayed in the same rooms, are works with the same special conservation needs or air-tight display-cases, with or without air-conditioning which

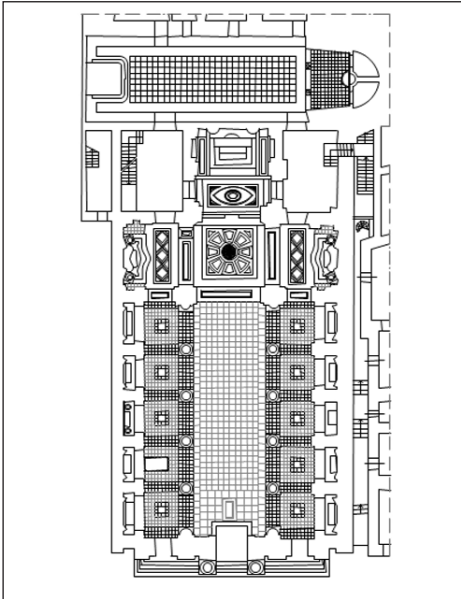


Figure 15. Plan of Church of Saint Matthew.

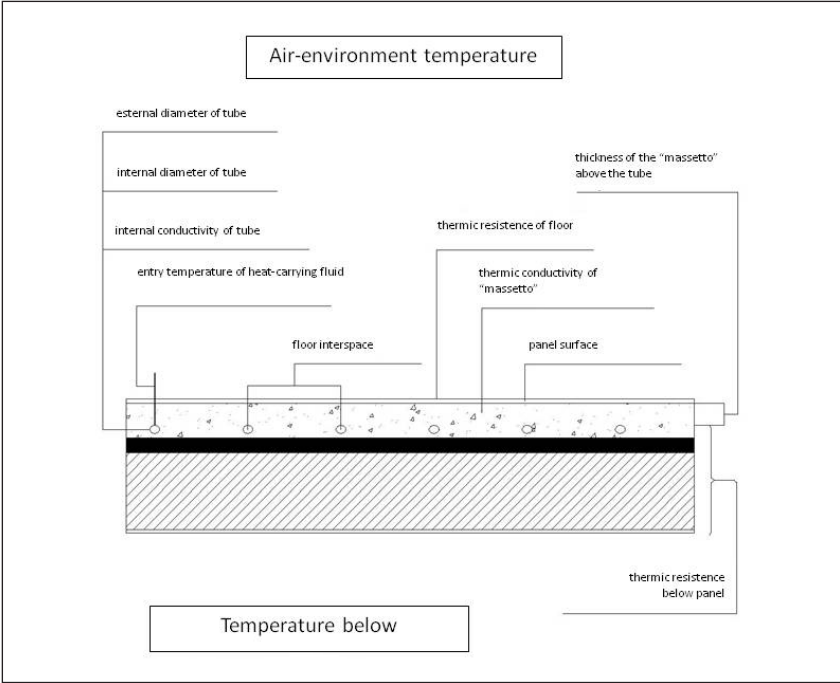


Figure 19. Parameters required to calculate the heat flux emitted by a panel.

contain materials that require a constant and/or controlled microclimate to limit direct contact with external pollutants [4]. A heating system (central or occasionally with electric heaters only in some environments) is the most used in 42% of cases. About 25% of the museums have air conditioning while the remaining 33% have no form of heating or cooling system whatever. The most widely used type of air conditioning is a mixed one utilizing primary air and fan-coil systems (see colour Figure 20, p. 220 and Figure 21, p. 221).

The presence of an air conditioning system is not always a guarantee of proper conservation of works of art, especially when an incorrect positioning of the heating system is added to the wrong energy management of the system. In 62% of the cases, the plant is operated only for part of the day, creating extreme changes between the period when the system is switched on and when it is switched off, showing indifference and/or negligence in relation to the conservation of the objects displayed (see colour Figure 22, p. 221).

The ideal solution for the correct conservation of objects in confined environments would be to adopt an air conditioning system with primary air, designed in such a way as to enable the regulation of the temperature, relative humidity, speed and air quality in each room depending on the items stored and the external climate.

Obviously this solution requires a rather complex design that can overcome the numerous technical, artistic and economic barriers existing in historical buildings.

## 8. Heating problems

There are a great number of heating problems in large environments. In general, these places are not frequented constantly and contain valuables and precious heritage artefacts for which the heating can often be a source of “disturbance”.

There are several factors that may influence the choice of heating system to be adopted in these particular places, as in the case of the church and the castle examined, including:

1. the liturgy and use of cultural heritage;
2. costs (installation, management and maintenance, restoration of works of art where the heating system accelerates the cycle of deterioration);
3. energy saving;
4. thermal comfort of visitors;
5. environmental impact, visual impact (radiators, fan-coils, heat pumps), invasive impact of system (lesion to structures generated from vibration of the central air-conditioning), type of fuel used;
6. compatibility with the conservation of the artifact.



The heating and cooling systems in these places especially involve skills of various kinds, artistic techniques and in the case of the church, even liturgical aspects.

The technical approach in these areas is of substantial importance, since the problem is associated with conservation, which also implies the micro-climate of the environment, the deposition rate of smoke (as in the case of votive candles), surface dust and the possible formation of phenomena generated from the degradation of organic objects [5].

In the Church, the distribution of heat must primarily respond to specific liturgical needs that require attention to specific areas and arrangements:

- ✓ respect for sacred objects;
- ✓ defining the areas to be heated permanently or to be used temporarily;
- ✓ different methods of heating for those who remain in a stationary position and for those who move;
- ✓ flexibility according to its utilization.

For the conservation of the historical building, the pros and cons of all the heating systems were tested. It was found that each had various kinds and degrees of problems. This does not mean that in special cases, with the adoption of relevant measures, these problems cannot be overcome. However, knowledge of the critical points may stimulate a greater understanding of how the final design should be, so that it not only respects existing legislation related to the protection of cultural heritage but also to the surrounding environment (in line with the new norms for the energy certification of buildings – D.Lgs. 192, 19/08/2005).

The proposed project involves the implementation, in both case studies, in the Castle of Chiamonte (Ag) and the Church of Saint Matthew (Pa), of radiant floor heating, cooling system and primary air. Particular attention was given to the careful examination of the existing flooring in both cases, noting the characteristics of the technical materials and taking into account the following stages of its dismantling, stacking, cleaning and relocation of the same, after the installation of the radiant coil heating system, placed under the floor.

## 9. Proposals for action

Through the analysis of environmental input it has been possible to carry out a feasibility study for a system of radiant panels, taking into account the study of the environmental conditions of the historical buildings examined. The analysis of the complex interaction between the dynamics of the climate, the need for the conservation of the artefacts under conditions of maximum stability, the problems concerning welfare issues for the

users, visitors to the exhibition space, type of construction and finally the need to cope with the worst conditions that could occur, are all factors which have obviously limited the choice made for the design of the plant system.

### 10. Radiant floor heating and cooling system and primary air

For our case studies a mixed system of water/air with radiant panels and primary air was chosen. Apart from heating, the system will be used for cooling during the summer season. The important control of the relative humidity and the air supply is entrusted to the primary air treated centrally and distributed by means of canals. The heat transfer fluid will be distributed using direct return circuits and depending on the area, by connecting the special area collectors for radiant panels. The temperature of the cooling system in summer, should be such that the floor temperature is below dew point, corresponding to environmental conditions of temperature and relative humidity, for usual values (25°C and 50% RH.), the surface temperature of the floor must not be less than 16°C. The radiant panels in the summer cycle have a low specific yield (30/40 W/m<sup>2</sup>) with a surface temperature from the primary air. In winter, thermal efficiency is about (60/80 W/m<sup>2</sup>) with a floor surface temperature of 27°C (Appendix).

The monitoring of the micro-climate carried out for the two case studies has revealed similar conditions. Both cases start out with premises that are unsuitable for the proper management and conservation of the historical buildings and the works of art contained in them (Figure 23).

The project proposal provides for the application of radiant floors<sup>4</sup> at low temperatures; the fluctuations in temperature are substantially mitigated because the heating occurs at a low temperature and the floors have a surface temperature of only about 25°C-28°C (Figure 24 and see colour Figures 25 and 26, p. 222).

Technological research has allowed these plants to develop better technical control. The most widespread type of floor heating today uses hot water.

It is important to note the achievement of the following optimal characteristics which are:

- low surface temperature of the floor;
- high proportion of radiant heat;
- uniformity of operating temperature;
- optimum integration inside building envelope.

This system, in the period of maximum thermal heat load, maintains the surface temperature of the floor below 29°C, resulting in a thermally comfortable environment.

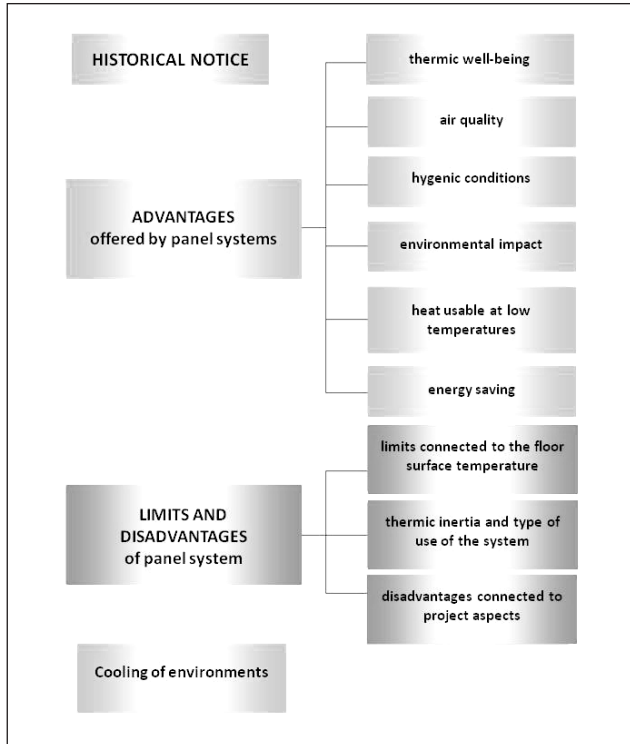


Figure 23. Flow chart: advantages and disadvantages of the plant with radiant panels.

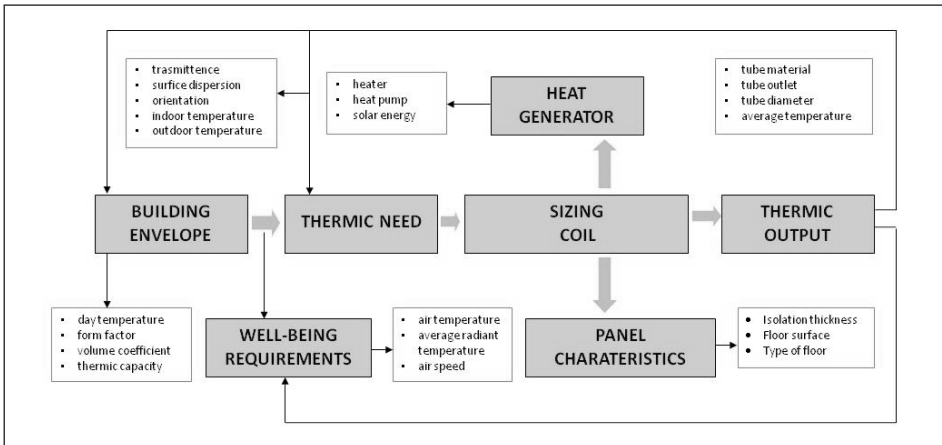


Figure 24. Block diagram showing layout for a radiant panel system.

Currently, the system used for the application of radiant panels which consist of tubes made of plastic materials (cross-linked polyethylene with an anti-oxygen barrier) refers to “floating” floors, which are well-insulated both below and at the edges between the floor and vertical walls.

The system can take the form of a continuous “coil” (spiral), made up of a series of parallel tubes, with a space interval of 25 cm: as an alternative it may consist of a grid with a series of parallel tubes embedded in concrete.

In particular, the spiral system achieves greater uniformity of floor surface temperature because of the alternating of the supply and return piping.

In the winter heating system, the heat-carrying fluid in the coil reaches a temperature of 30-40°C and reaches the surface at a temperature of about 24-27°C or 10°C less than body temperature (see colour Figure 26, p. 222). In this way, there is a simultaneous and reciprocal heat exchange between the human body and the floor; it follows that a person gives off less heat than he/she would with other types of systems.

Below we indicate how to design a radiant floor heating system with particular reference to the Castle of Chiaramonte in Favara.

The containment structure of the radiant panel consists of:

1. slab;
2. insulation material;
3. screed;
4. floor.

The insulating material is placed under the panels and serves to reduce downward heat transfer and to limit the thermal inertia of the system. Currently, the most commonly used insulating materials are polystyrene and polyurethane.

The shape for the anchoring of the pipes onto the insulating material can be flat or preformed. The flat-surfaced insulation is that which is commonly used for insulating traditional flooring in construction. They must be installed using welded wire mesh, as they are not provided with support for the anchorage of the tubes, or specific profiles with metal clip junctions and mounting brackets.

The screeds must be made with a fluid mixture to avoid the formation of air pockets, which impede the regular provision of heat. The fluidity of the jet can be improved by using special chemical additives which can liquefy the mixture, reducing the amount of water needed for the mixture and restricting the time for the removal of the water itself [7].

It is important to ensure the expansion of the screed and the thermal isolation between the screed and the walls and for this reason, the peripheral joints must be

made with polyethylene insulation strips of 6-8 mm, or mineral wool of 8-10 mm.

The pipes used in the construction of the radiant panel are in plastic, because they are easier to implement, do not deteriorate and prevent the formation of sediment.

The tubes usually used are made of cross-linked polyethylene (PEX), polybutene (PB) and polypropylene (PP), fitted with barriers to prevent the emission of oxygen and the molecular deterioration of the pipes themselves.

In the construction of a radiant floor heating system with water, it is important to note that the temperature of the hot water temperature input must be between: (45°C-55°C), (40°C-45°C), (32°C-38°C). The temperature of the heating fluid must be regulated according to the type of heat generator to be adopted.

Temperature values in fact range from:

- 45°C to 55°C with conventional boilers;
- 40°C to 45°C with urban heating, heat pumps and condensing boilers;
- 32°C to 38°C with solar energy systems.

It is important, however, not to choose temperatures above 55°C, to prevent possible cracks in floors, fissures in parquet flooring and depressions in flooring made of rubber or other synthetic materials. Furthermore, in choosing the correct temperature for the heating fluid, two different needs will be satisfied in a positive way. They are:

1. A reduction in the length of the panel, which also leads to a reduction in the costs of implementation;
2. The optimization of the performance of the heat generator.

With heating radiators or convectors usually placed below windows, there is a greater dispersion compensation due to their radiant effect. With the radiant heating system this becomes a limitation.

If we use a radiant floor heating, there is a problem. To avoid this, the solution is to decrease the distance between the tubes near the glass surfaces.

The forms of distribution to be adopted will vary each time, depending on the conditions to be achieved. As radiant floor systems have a large surface area of dispersion, environments can be heated using low temperatures.

This feature makes it convenient for them to be used with heat sources whose yield increases when the temperature decreases, as in the following cases:

- heat pumps;
- condensing boilers;
- solar panels;
- heat recovery systems.

The heat pump, as is known, is a machine that can take heat from a heat source and transfer it to a receiver at a higher temperature, making a real transfer of heat from one level of temperature to a higher level, that is to say, in the opposite direction to that occurring in spontaneous conduction.

In practical applications, the medium to which the heat is transferred is mainly water, for the benefits it offers:

- high specific heat;
- excellent transfer coefficient.

The heat pump absorbs power (Kw) proportional to the amount of heat transferred in the unit of time. The “efficiency ratio” of the heat pump or “coefficient of performance” (C.O.P.) is the relationship between the power (Q) supplied inside the building-envelope and the electrical power consumption (Kw):

$$\text{C.O.P.} = Q \text{ (Kcal/h)} / 860 \times \text{Kw}$$

The heat sources mainly used can be:

- well water;
- aquifer;
- surface water;
- waste water from sewage treatment plants;
- ambient air.

Therefore, depending on the solutions adopted, there are:

- water/water heat pump;
- air/water heat pump;
- air/air heat pump.

In the two cases examined air-water heat pumps were used to feed the circuits of the radiant floor heating and cooling systems.

### 11. Outline of implementation costs

It is really difficult to determine the significant mean values of the costs required to realize the radiant panel systems, for the two case studies, as there are a number of variables to consider:

- thermal resistance of the floor;
- cost of insulation materials to be placed under the panels;
- cost and quality of the pipes constituting the panels.

It is usually estimated that the panels have on average, an additional cost of 10-30% compared to radiators with climate control.

On the other hand, the costs for managing these facilities allow for a saving of 10-15% compared to conventional installations, thus allowing the greater amount spent in installing them to be recovered in a relatively short time.

In the case of the Castle of Chiaramonte in Favara an estimate of the operating costs for the heating/cooling systems was made, considering that the volume heated is  $V = 10.605 \text{ m}^3$  and the thermal power ( $Q = 60 \text{ Kw}$ ), the following costs were obtained:

<b>FUELS</b>	<b>COST(euro)</b>
<b>Gas oil</b>	<b>21.759</b>
<b>Methane</b>	<b>15.483</b>
<b>Electric power</b>	<b>8.640</b>

There is a net economic benefit with regard to the heat pump system.

The cost of implementing a radiant floor system ranges from 47-67 euro/m<sup>2</sup>, installation and excluding the overlying screed. This system costs about 60-70% more than a traditional system (the radiant floor system), and costs about 25-35 euro/m<sup>2</sup>, depending also on the materials used. To this must be added the cost for the removal or demolition of the floor and the thermal insulation sealing of the screed.

## **12. Conclusions**

For a correct approach to the theme of environmental control of cultural heritage in museums, it is not only necessary to provide the building envelope with sophisticated environmental control systems, but also to know the real environmental conditions which exist and to establish, prior to any installation, whether or not these environmental conditions and the preservation of the artefacts are compatible. Hence the importance that environmental monitoring has taken on, as a monitoring tool for the compilation of data and its interpretation. The analysis of the complex interaction between the dynamics of the climate, the need to preserve the "museum" in conditions of maximum stability, the problems regarding the technical well-being of the public, the users of the exhibition spaces, the type and design of the building envelope and finally, the need to deal with the worst weather conditions limit the choice of the heating and cooling system.

## HISTORICAL SUMMARY

### Appendix 1

#### **Castle of Chiaramonte in Favara (Ag)**

It is one of the first examples of Sicilian art from the fourteenth century, built by the Chiaramonte family (of French origin: Clermont). At that time the family name had great political bearing and exercised its feudal rights in a large part of Sicily throughout the 14<sup>th</sup> century. The influence of the Chiaramonte was such that this century is remembered in Sicilian history as the “*epoca Chiaramontana*” (the Chiaramonte era). This influence also extended to the areas of architecture and art of the period which, recalling themes and motifs from Norman architecture, developed its own distinctive style known as “*Chiaramontano*”.

The first western example in which the architectural military lesson learnt from the east shows its success and clever recasting in aesthetically original forms, is the network of castles built in Puglia and Sicily. With their regular, symmetrical plan and in their precise relationship with the surrounding environment (ie. castles within the city which were the seat of officials or garrisons), they arose in function of a centralized state structure (see colour Figure 27a, b, c, p. 223).

#### *Floor plan*

The Castle has the typical characteristics of a fortified settlement and is residential. It has a rectangular floor plan, in the Severe style, the building with a volume well circumscribed and defined is centered around a small courtyard. It was built in the last decades of the thirteenth century, between the end of the Swabian-Anjou period and the beginning of the Aragonese period, on the orders of Frederic II Chiaramonte. The original layout with respect to the present configuration of the Castle was more imposing, as it included another fort with crenellated walls and a tower on each of the four corners (one of which was destroyed together with the outer walls after 1820).

Here is a short description of the present-day layout of the castle: from the entrance one passes into the hall, which was the original entrance to the inner courtyard and gave free access to the premises on the ground floor. To the east of the courtyard there are three small rooms first used as a kitchen and then as a prison. On the northern side there is a small room which acted as a pantry. On the west side there is a room that was used firstly as a stable. From some stairs situated on the west side of the inner courtyard access is gained to the first floor through a *loggia* covered with a vaulted ceiling deco-



rated with a *Chiaramonte* style frieze, recalling once more the Arab-Norman style. Later in 1500, the loggia was modified with a mullioned windows in the Renaissance style. The loggia leads directly into the room of the Crucifix: the octagonal columns from which the ribs of the cross vaults branch off and cover it. Adjacent to the room of the Crucifix is the Chapel, the most noble and artistically the most qualifying, it is divided into two parts by an arch supported by two columns surmounted by capitals with acanthus leaves. A dome covers the first part of the Chapel, which from the outside appears to be of an irregular shape, while inside there are a series of perfectly squared limestone shards.

Passing through the presbytery, cut into the thickness of the facing wall there is a semi-circular apse with a central slit flanked by columns.

The main entrance is surmounted by a magnificent gothic portal, decorated in white stone, depicting ancient Roman chariots. On the first floor there is a stateroom and the living quarters of the lord.

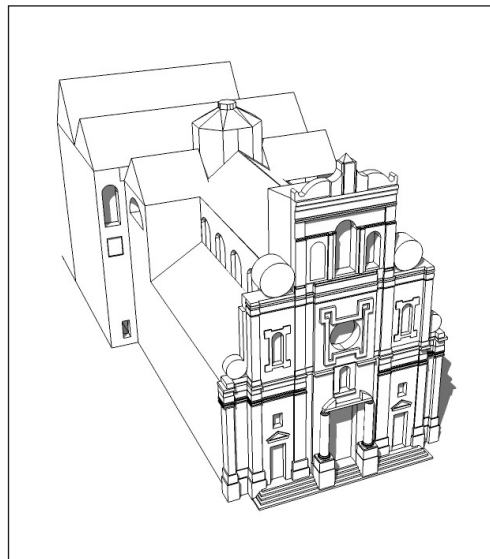
## Appendix 2

### *Church of Saint Matthew*

On the day dedicated to Saint Matthew the Apostle, Roger I, Count of Sicily, received the oath of allegiance and subjection from the people of Palermo, who acclaimed him king. To commemorate this event, among the first institutions to be erected were the church and the monastery of Saint Matthew, run by Brazilian nuns.

The Church of “the glorious Saint Matthew the old” was built in 1088 by Augustus Roger Norman and solemnly consecrated in 1113.

The church was incorporated into the structure of Saint Catherine and housed the first group of Dominican friars, who had just arrived in Palermo. The temple, in its present configuration, was built with the alms collected by lay brother Leonardo Galici between 1634 and 1647 (see colour Figure 28a, b, c, p. 224-225 and Figure 29).



*Figura 29. Plan in 3D of the Church of Saint Matthew.*

### Floor plan

The interior still has a Renaissance layout, in the form of a basilica with three naves, a transept and a rectangular chapel. The dome rises at the intersection of the transept and the nave. In the eighteenth century the church was enriched with marble wall coverings, paintings and stucco decorations characterizing it as a distinctly Baroque temple (see colour Figure 30, p. 225).

### Notes

- <sup>1</sup> Example: conservation of wood, exposure to light of terracotta or glass.
- <sup>2</sup> Castle of Venaria; Galleria Diana; Castle of Udine; Church of Saint Stephen in Mariano Comense; Church of Onara in Tombolo Padova; Church of Saint Joseph in Padova; Galleria Meravigli in Milan; Planetarium in Rome; Egyptian Museum in Turin.
- <sup>3</sup> Conservation at times neglected, is a mandatory requirement, as declared in Italian law (*DLg. 22/01/2004, n. 42, "Codice dei beni culturali e del paesaggio, ai sensi dell'art. 10 della legge 6/07/2002, n. 137" G.U. n. 45 del 24/02/2004, S.O. n. 28*): "Cultural heritage cannot in any way be destroyed, damaged" (article 20). "Protection consists in... guaranteeing the preservation and conservation for purposes of public conservation" (article 3).
- <sup>4</sup> Measurements of indoor environment can be gained via the control unit can easily accommodate different sensors. The measurements of indoor environment most commonly found are:
  - Temperature;
  - Relative humidity;
  - Thermal flow;
  - Radiation;
  - Illumination;
  - Atmospheric pressure, differential;
  - Noise;
  - Ph.

Babuc instruments are also designed to accommodate other types of sensors to receive standard analog signals.

### References

- [1] CAMPIONE F., triennio accademico '94/'95, '96/'97, *Il controllo del microclima per la conservazione di opere d'arte in ambienti storico-museali*, Tesi di dottorato.
- [2] BALLARDINI R., CUPPINI G. 1994, *Gli impianti nel progetto del restauro, Recuperare*, edizione PEG, n. 40.
- [3] FILIPPI M. 1987, *Gli impianti nei musei*, CDA, n. 8.

- [4] AA.VV. *Microclima*, 7 febbraio 1997, *Qualità dell'aria ed impianti negli ambienti museali*, AICARR, Firenze.
- [5] AA.VV. 2006, *Il riscaldamento nelle chiese e la conservazione dei beni culturali*, Milano, ELECTA.
- [6] CAMPIONE F., DI MATTEO U. 1993, *Una metodologia di indagine sulle variabili di integrazione dell'edificio-ambiente in un progetto di restauro*, Bollettino dell'Ordine degli Ingegneri della provincia di Palermo, Palermo.
- [7] CAMPIONE F., MILONE A. 2001, *Resa termica e caratteristiche del riscaldamento a pavimento*, rivista Selezione Tecnica, n. 11, Ed. Zedi Italia.

### Linkgrafia

[www.isac.cnr.it](http://www.isac.cnr.it)

[www.deltasolar.it](http://www.deltasolar.it)

[www.riscaldamentoelettrico.it](http://www.riscaldamentoelettrico.it)

## **La gestione del microclima per la conservazione dei Beni Culturali**

*Parole chiave:* microclima, beni culturali, impianto di climatizzazione a pannelli radianti

### **1. Il controllo del microclima negli ambienti museali**

*Negli ultimi decenni, il controllo del microclima negli ambienti museali, ha assunto un ruolo di grande importanza per la salvaguardia delle opere d'arte, in quanto si è compreso come esso è la causa scatenante dei processi di degrado dei materiali o delle singole parti costituenti gli oggetti di un Bene Culturale più in generale.*

*Un manufatto d'interesse storico, artistico e culturale, non può essere considerato isolato dall'ambiente circostante con il suo microclima, ma costituisce con esso, un sistema fisico, che interagisce ed evolve nel tempo.*

*Il degrado può essere definito come un processo progressivo e cumulativo dei materiali, quest'ultimi rispondono in modo diverso ai valori assunti dalle variabili ambientali e ai loro cambiamenti, sia in senso temporale che spaziale. Rapide variazioni temporali (o forti gradienti spaziali) di temperatura e/o umidità relativa, o comunque scambi di calore e massa, com'è noto, causano in molti materiali stress interni con effetti irreversibili e cumulativi che accelerano il processo di degrado.*

*Per ogni oggetto è necessario considerare prioritariamente la sua storia pregressa, in cui il microclima ha determinato un assetto del materiale relativamente alle sue caratteristiche fisico-chimiche.*

*Da qui nasce l'esigenza di monitorare i parametri ambientali, in quanto ogni perturbazione ambientale contribuisce ad accelerare il processo di degrado [1].*

*Per tal motivo che si è deciso di occuparsi di due casi studio, e di come a tutt'oggi viene trascurato l'utilizzo di nuove tecnologie applicate per il controllo di un idoneo microclima in ambiente confinato.*

Nei due casi studio, sono stati presi in considerazione le variabili ambientali di: Palazzo-Castello medievale dei Chiaramonte di Favara (Agrigento-Appendice 1) (Figura 1 a colori, p. 211) e la Chiesa di San Matteo (Palermo-Appendice 2) (Figura 2 a colori, p. 212).

Pertanto, in entrambi gli studi, è stato attenzionato il controllo del microclima, identificato soprattutto attraverso le condizioni di Temperatura ed Umidità in cui i Beni quotidianamente vengono esposti, al fine di permettere un adeguata conservazione [2].

## 2. Controllo termodinamico dell'involucro

L'edificio, in generale, può essere considerato come un sistema termofisico e come tale coinvolge diverse sfere di conoscenza. Lo scopo è quello di mantenere in esso determinate condizioni di microclima interno, riveste un ruolo fondamentale il rapporto tra involucro ed impianto di riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria, la cui interazione è responsabile del raggiungimento delle condizioni ideali (Figura 3).

Considerando che la maggior parte dei musei italiani risiedono in edifici storici, per molti dei quali non si conosce con esattezza la consistenza edilizia ed impiantistica, si può intuire quanto difficile sia poter studiare e realizzare interventi di controllo a garanzia di un corretto e costante microclima a tutela del bene stesso e di tutto ciò che esso custodisce. Lo sforzo sta nel riuscire a considerare che gli oggetti museali, richiedono condizioni microclimatiche diverse e non sempre tali condizioni sono compatibili con il benessere di visitatori ed operatori. È chiaro che non si può climatizzare ogni singolo bene, a parte in casi sporadici di beni di particolare valore ed unicità storico-artistica [3].

## 3. Ambienti espositivi e microclima

Ai fini di una corretta valutazione è stata necessaria un'analisi preliminare che ha tenuto in considerazione:

- la valutazione dello stato di conservazione dei manufatti oggetto di studio;
- lo studio dell'andamento dei parametri microclimatici e della qualità dell'aria dell'ambiente in cui i manufatti si trovano;
- il giudizio complessivo di valutazione e l'interazione con l'ambiente, "stato di conservazione/ambiente".

Il microclima inteso come sintesi delle condizioni fisiche ambientali dovute, non solo alle variabili atmosferiche quali temperatura ( $T$ , °C), umidità ( $U$ , %), irraggiamento solare e vento, ma anche a scambi con altri corpi tipo emissione infrarossa, riscaldamento e ventilazione, su un periodo di tempo rappresentativo di tutte le condizioni determinate da fattori forzanti naturali e causati dall'uomo. Tale fase di analisi è stata propedeutica alle scelte progettuali fatte in seguito.

## 4. Microclima favorevole per la conservazione

Un manufatto storico che si è adattato alle condizioni ambientali ed ha trovato un "proprio equilibrio" subirebbe uno stress se portato a delle condizioni diverse da quelle originali, appunto per l'incapacità di adattarsi ad un nuovo microclima. Per queste ragioni è necessario avere una conoscenza accurata delle condizioni di conservazione passate del Bene. Tutti i cambiamenti improvvisi dei parametri microclimatici, così come i cicli giornalieri, sono pericolosi. I cicli stagionali, essendo più lenti, sono meno dannosi, permettono di creare le condizioni di equilibrio tra i materiali e l'ambiente, e tra gli strati interni ed esterni. Tali, sono in genere le condizioni fisiche in cui una variazione di umidità relativa (UR) porta la minor possibile variazione nell'assorbimento del vapor d'acqua. Conviene in ogni caso, per mantenere sempre costanti le condizioni, scegliere dei valori di UR vicini a quelli naturali.

Nella seguente tabella (Tabella 1) sono indicati, i gruppi di sensibilità alla temperatura ed all'umidità relativa ed alcuni materiali costituenti oggetti museali presenti nei nostri casi studio.

## 5. Indagine microclimatica del Castello di Chiaramonte di Favara (Ag)

Il monitoraggio microclimatico si prefigge di individuare tutte le interazioni tra

il clima esterno e quello interno, in seconda analisi come la struttura muraria e le superfici interne reagiscono al carico termico indotto dalla presenza di fonti di calore sensibile e latente, come il riscaldamento, l'illuminazione naturale, artificiale, i visitatori. Le Figure 4 e 5 a colori a p. 212 e 213 sono relative alla Sala Mostre e alla Sala Conferenze.

Dall'indagine microclimatica risulta che i valori di Temperatura (°C) ed Umidità Relativa (%), si discostano da quelli ottimali per cui si è ritenuto opportuno proporre un impianto con pannelli radianti ad aria primaria alimentati a pompa di calore sia a piano terra che a piano nobile (il pavimento in tutti i piani è in mattoni di argilla cotta). Nella Figura 6 a colori a p. 213 si riporta il progetto dell'impianto di climatizzazione a pannelli radianti ad aria primaria, relativa al piano terra ed al piano nobile.

Per meglio evidenziare, il comportamento termico dell'involucro sottoposto alle sollecitazioni termiche esterne, si riporta qui di seguito nelle tabelle (Figura 7a, b, c, d, e, f a colori, p. 214), la simulazione dell'impianto a pannelli radianti in regime estivo ed invernale.

## **6. Indagine microclimatica nella Chiesa di San Matteo (Pa)**

I rilievi spazio temporali della Temperatura e dell'Umidità Relativa, all'interno della Chiesa, sono stati eseguiti secondo il procedimento secondo la norma. È stata adottata una griglia posta all'interno della Chiesa di lato 3×3 m (Figura 8 a colori, p. 214) posizionata ad una altezza dal pavimento di 5 m, e mediante un apparecchio portatile (Babuc/M) sono state rilevate: la Temperatura, l'Umidità Relativa dai nodi da noi prescelti (Figura 9 e 10 a colori, p. 215).

Sono state identificate inoltre le tipologie dei materiali costituenti la collezione della Chiesa di San Matteo (Figura 11 a colori, p. 216).

I rilievi sono stati compiuti in un arco di tempo che va dal 23 gennaio al 5 giugno 2007, in particolare sono stati presi in esame i dati emessi da una delle dieci cappelle della Chiesa, la "Cappella dell'Angelo Custode" (Figura 12 a colori, p. 216).

Il seguente dipinto, raffigurante "l'Angelo Custode" è un olio su tela (280×180 cm) del XV<sup>III</sup>, di artista ignoto, orientato secondo la direzione Sud-Ovest dell'edificio. Appartiene alla categoria di materiali e oggetti di natura organica, così come viene espressamente indicato dalla norma UNI 10829, in quanto si tratta di un olio su tela. Tra tutti i dipinti presenti nella Chiesa è il più degradato presenta alterazione del colore, esfoliazioni e crepe. Quest'ultime sono dovute alle variazioni rapide di UR che determina stress particolarmente dannosi per gli strati più superficiali dei manufatti. Le tele, per esempio, rispondono immediatamente alle sollecitazioni termiche esterne.

Si riportano di seguito i rilievi (Figura 13a, b, c, d a colori, p. 217-218) della Temperatura e Umidità Relativa nel periodo che va da gennaio a giugno.

Come si evince dalle Figure sopra citata i valori rilevati si discostano notevolmente dalle condizioni ottimali (Figura 14) e quindi si è ravvisata l'opportunità di prevedere un impianto di climatizzazione a pannelli radianti ed aria primaria per il raggiungimento delle condizioni di comfort. La scelta deriva da una attenta analisi della pavimentazione della Chiesa di San Matteo e di cui si riporta planimetria e documentazione fotografica (Figura 15 e Figura 16a, b, c, d a colori, p. 219).

Si riporta la planimetria relativa al sistema di posa in opera a pannelli radianti ed aria primaria alimentato da pompa di calore aria-acqua, e sezione della realizzazione per il pavimento radiante (Figure 17 e 18 a colori, p. 220; Figura 19).

## **7. Gli impianti di climatizzazione nei musei italiani**

Nel 56% dei musei italiani vengono esposti, nelle stesse sale, opere con esigenze conservative uguali oppure vengono utilizzate vetrine a tenuta d'aria, climatizzate o meno, per contenere materiali che necessitano di un microclima costante e/o controllato, per limitare il contatto diretto con agenti inquinanti esterni [4].

L'impianto di riscaldamento (centralizzato o talvolta con radiatori elettrici nei soli locali interessati) è il più utilizzato nel 42% dei casi; il 25% dei musei è dotato di un impianto di condizionamento mentre il rimanente 33% è totalmente sprovvisto di un qualunque accorgimento per il riscaldamento o raffreddamento dell'aria. Il tipo di impianto di climatizzazione più usato è quello misto, aria primaria o ventilconvettori (Figure 20 e 21 a colori, p. 220-221).

La presenza di un impianto di climatizzazione non è sempre garanzia di una corretta conservazione degli oggetti esposti, soprattutto quando ad un errato posizionamento dei corpi scaldanti si aggiunge l'errata gestione dell'impianto.

Nel 62% dei casi l'impianto viene messo in funzione soltanto parte della giornata, creando forti sbalzi fra il periodo di accensione e quello di spegnimento, evidenziando inconsapevolezza e/o disinteresse per la conservazione degli oggetti esposti (Figure 22 a colori, p. 221).

La soluzione ideale per una buona conservazione degli oggetti, negli ambienti confinati, sarebbe l'adozione di un impianto di condizionamento a tutt'aria, realizzato in maniera da poter regolare i valori della temperatura, dell'umidità relativa, della velocità e della purezza dell'aria dei singoli ambienti in funzione degli oggetti conservati e del clima esterno.

Ovviamente tale soluzione richiede una progettazione piuttosto complessa che riesca a superare i molti ostacoli tecnici, artistici, ed economici, presenti nel Bene culturale.

### 8. Le problematiche del riscaldamento

Le problematiche del riscaldamento in ambienti molto ampi sono molteplici, trattasi di luoghi non frequentati costantemente contenenti preziosi patrimoni, ai quali il riscaldamento spesso può essere fonte di "disturbo".

Vi sono vari fattori che possono influenzare la scelta del tipo di riscaldamento da adottare in questi particolari luoghi, così come nella fattispecie nella Chiesa e nel Palazzo, quali:

1. liturgia ed uso del Bene;
2. costi (installazione, funzionamento e manutenzione, restauro di opere d'arte nel caso in cui il sistema ne acceleri il decadimento);
3. risparmio energetico;
4. comfort termico dell'utenza;
5. impatto ambientale, impatto visivo (radiatori, ventilconvettori, pompe di calore), impatto invasivo del sistema (danni alle strutture derivanti da vibrazioni generate dalla centrale di climatizzazione), tipologia di combustibile impiegato;
6. compatibilità con la conservazione del Bene.

L'impianto di climatizzazione in questi luoghi, in special modo, coinvolge competenze di varia natura, artistiche tecniche, e nel caso della chiesa, anche liturgiche.

L'aspetto tecnico, in tali ambiti, è di sostanziale importanza, in quanto al problema impiantistico si associa quello conservativo, che implica anch'esso il microclima ambientale, la velocità di deposizione di fumi (come nel caso di utilizzo di ceri votivi), polveri sulle superfici e l'eventuale formazione di fenomeni di degrado biologico [5].

Nel caso della Chiesa la distribuzione del calore deve primariamente rispondere a precise esigenze liturgiche che richiedono l'attenzione a zone e modalità particolari:

- ✓ rispetto del sacro;
- ✓ definizione delle aree da riscaldare permanentemente o per occupazioni temporanee;
- ✓ modalità di riscaldamento diverso per chi mantiene una posizione stazionaria e per chi ha una maggiore dinamica;
- ✓ flessibilità a seconda dell'uso.

Ai fini della conservazione del Bene culturale, sono stati testati pro e contro di tutti i sistemi di riscaldamento, si è appurato che ognuno presenta problemi di vario tipo e gravità. Ciò non significa che in particolari casi, con l'adozione di

eventuali accorgimenti, i problemi indicati non possano essere superati. Tuttavia la conoscenza dei punti critici può incentivare una maggiore consapevolezza per una corretta progettazione finalizzata al rispetto delle normative e non solo quelle riferite alla tutela del bene culturale ma anche all'ambiente circostante (per attenersi alle nuove norme di certificazione energetica degli edifici – D.Lgs. 192 del 19/08/2005).

La proposta progettuale prevede la realizzazione, all'interno di entrambe i casi studio, Castello Chiaramonte (Ag) e Chiesa di San Matteo (Pa), di un impianto di climatizzazione a pannelli radianti ed aria primaria.

Si è data particolare rilevanza ad un attento studio della pavimentazione esistente in entrambe i casi, rilevandone le caratteristiche dei materiali tecnici, tenuto conto delle seguenti fasi di smontaggio, accatastamento, pulitura dello stesso e ricollocazione, dopo aver effettuato la posa in opera del serpentino radiante, annegato nel sottofondo del pavimento.

### **9. Proposte di intervento**

Attraverso l'analisi degli input ambientali è stato possibile effettuare uno studio di fattibilità per l'impianto a pannelli radianti tenendo conto dello studio delle condizioni ambientali dei Beni presi in considerazione. L'analisi della complessa interazione tra la dinamica delle condizioni climatiche, la necessità di conservazione dei manufatti in condizioni di massima stabilità, le problematiche sul benessere termico relativo all'utenza, fruitore degli spazi espositivi, tipologia costruttiva dell'edificio ed infine la necessità di dover far fronte alle peggiori condizioni che si possono verificare, tutto ciò ha, sicuramente, vincolato la scelta impiantistica.

### **10. Impianto di climatizzazione a pannelli radianti a pavimento ed aria primaria**

Per i nostri casi studio è stato scelto un impianto misto acqua/aria con pannelli radianti a pavimento ed aria primaria. Oltre che per il riscaldamento l'impianto verrebbe utilizzato per il raffrescamento durante la stagione estiva. L'importante controllo dell'umidità relativa e del ricambio d'aria, affidato all'aria primaria trattata centralmente e distribuita con canali. La distribuzione del fluido termovettore sarà effettuata mediante circuiti a ritorno diretto, collegando a seconda delle zone gli appositi collettori di zona per pannelli radianti. La temperatura dell'acqua nei pannelli, nel periodo estivo, deve essere tale da impedire che la superficie del pannello raggiunga temperature inferiori a quella di rugiada, corrispondente alle condizioni termoigrometriche ambientali, per valori usuali (25°C e 50% U.R.), la temperatura superficiale non deve essere inferiore a 16°C. I pannelli radianti in ciclo estivo hanno una resa specifica bassa (30/40 W/m<sup>2</sup>) con una temperatura superficiale dall'aria primaria. In inverno invece, la resa termica è di ca (60/80 W/m<sup>2</sup>) con una temperatura superficiale del pavimento di 27°C (Appendice).

Il monitoraggio microclimatico effettuato ai casi studio, ha rilevato condizioni simili tra loro, entrambe partono da presupposti che non sono idonei ad una giusta gestione e conservazione del Bene stesso e delle opere d'arte in essi contenuti (Figura 23).

La proposta progettuale prevede l'applicazione di pavimenti radianti a bassa temperatura; le fluttuazioni della temperatura sono notevolmente mitigate in quanto il riscaldamento avviene a bassa temperatura ed i pavimenti hanno una temperatura superficiale soltanto di circa 25°C-28°C (Figura 24; Figure 25 e 26 a colori, p. 222).

La ricerca tecnologica, ha consentito a tali impianti, di sviluppare una migliore tecnica di controllo. Il tipo di riscaldamento che oggi trova maggiore diffusione, per la disposizione a pavimento è quello ad acqua calda.

In esso, è importante osservare il raggiungimento ottimale delle seguenti caratteristiche, quali:

- la bassa temperatura della superficie del pavimento;
- l'elevata percentuale d'irraggiamento del calore;

- l'omogeneità della temperatura operante;
- la perfetta integrazione nel contenitore edilizio.

Tale sistema, nel periodo di massimo fabbisogno termico, manterrà la temperatura superficiale del pavimento sotto i 29°C, rendendo il clima particolarmente piacevole.

Attualmente il sistema d'esecuzione per l'applicazione di pannelli radianti costituiti da tubi in materiale plastico (polietilene reticolato con barriera antiossigeno) costituiti da pavimenti "galleggianti" ben isolati sia verso il basso, sia ai bordi tra pavimento e pareti verticali.

Il sistema può avere la forma di un "serpentino" continuo (detto a chiocciola), realizzato da una serie di tubi paralleli, con un passo di 25 cm circa collegati tra loro mediante curve, in alternativa può essere costituito da una griglia, con una serie di tubi paralleli annegati nella struttura facenti capo a due collettori.

In particolare il sistema a chiocciola, consente di ottenere una maggiore uniformità della temperatura superficiale del pavimento per via dell'alternanza delle tubazioni di mandata e ritorno.

Nella climatizzazione invernale, il fluido termovettore della serpentina raggiunge la temperatura di 30-40°C e si ritrova in superficie a 24-27°C ovvero a 10°C in meno di quella corporea (Figura 26 a colori, p. 222). Si verifica in questo modo un contemporaneo e reciproco scambio termico tra il corpo umano ed il pavimento ne consegue che l'uomo cede all'ambiente meno calore di quanto farebbe con altre tipologie impiantistiche.

Si riporta qui di seguito la procedura di calcolo per il dimensionamento del serpentino, nel caso specifico del Castello Chiaramonte.

La struttura di contenimento del pannello radiante è costituito:

1. dalla soletta;
2. dal materiale isolante;
3. dal massetto;
4. dal pavimento.

Il materiale isolante, è posto sotto i pannelli, e serve a ridurre il calore ceduto verso il basso e a limitare l'inerzia termica dell'impianto. Attualmente, i materiali isolanti più utilizzati sono quelli in polistirene e in poliuretano.

La forma per l'ancoraggio dei tubi sul materiale isolante, può essere a superficie piana o preformata.

Gli isolanti a superficie piana sono quelli, che solitamente si utilizzano in edilizia, per coibentare i tradizionali pavimenti. Essi richiedono una messa in opera con reti elettrosaldate, essendo non provvisti di supporti per l'ancoraggio dei tubi, oppure di adeguati profili metallici con clips di giunzione e supporti di fissaggio. Il massetto, deve essere realizzato con un impasto fluido, per evitare la formazione di sacche d'aria, le quali possono ostacolare la regolare trasmissione di calore. La fluidità del getto può essere migliorata, utilizzando appositi additivi chimici, che hanno la funzione di fluidificare l'impasto, riducendo la quantità di acqua necessaria all'impasto, limitandone il tempo di rimozione dell'acqua stessa [7].

È fondamentale assicurare la dilatazione del massetto e l'isolamento termico fra questo e le pareti, a tal motivo, si devono realizzare i giunti periferici, con strisce isolanti in polietilene da 6-8 mm, oppure in lana minerale da 8-10 mm.

I tubi impiegati per la realizzazione del pannello radiante sono in materiale plastico, poiché la loro messa in opera è più agevole, non si logorano e non consentono la formazione di sedimenti.

I tubi usualmente impiegati sono in polietilene reticolato (PEX), polibutene (PB) e polipropilene (PP), muniti di barriere contro l'emanazione dell'ossigeno, per evitare il deterioramento molecolare dei tubi stessi.

Nella realizzazione di un impianto di riscaldamento ad acqua, con sistema radiante a pavimento, è importante osservare che la temperatura del fluido termovettore di mandata sia ad una giusta temperatura. Si impone una temperatura del fluido scaldante in funzione del tipo di generatore di calore che si vuole adottare.

I valori di temperatura variano infatti da:

- 45°C a 55°C con caldaie tradizionali;



- 40°C a 45°C con teleriscaldamento, pompe di calore e caldaie a condensazione;
- 32°C a 38°C con pannelli solari.

È importante, in ogni caso, non scegliere temperature superiori a 55°C, per evitare le possibili crepe nei pavimenti, fessurazioni nei parquet e avvallamenti nelle pavimentazioni di gomma o altri materiali sintetici.

Inoltre, scegliendo in modo corretto il valore della temperatura del fluido scaldante, si otterrà un buon esito, tra due diverse necessità, quali:

1. la diminuzione della lunghezza del pannello, che determina anche una limitazione dei costi di realizzazione;
2. l'ottimizzazione del rendimento del generatore di calore.

Con il riscaldamento a radiatori o a convettori, posti generalmente sotto le finestre, si ha una compensazione delle maggiori dispersioni grazie al loro effetto radiante. Con il pannello radiante tutto ciò diventa una limitazione. Per ovviare ciò, si può utilizzare la soluzione dell'infittimento dei tubi in prossimità delle superfici vetrate.

Le forme di distribuzione da adottare variano di volta in volta, in funzione alle condizioni che si vogliono ottenere.

I pannelli radianti avendo un'elevata superficie disperdente, permettono di riscaldare ambienti anche con l'impiego di basse temperature.

Questa caratteristica rende conveniente il loro impiego con sorgenti di calore la cui resa aumenta al diminuire della temperatura richiesta, come nei seguenti casi:

- pompe di calore
- caldaie a condensazione
- pannelli solari
- sistemi di recupero del calore.

La pompa di calore, come noto, è una macchina in grado di prelevare energia termica da una sorgente di calore e trasferirla ad un ricevitore a temperatura più elevata, operando un vero e proprio trasferimento di calore da un livello di temperatura ad uno superiore, cioè in senso opposto a quello che avviene in conduzione spontanea.

Nelle applicazioni pratiche, il mezzo a cui viene ceduta l'energia termica è prevalentemente l'acqua, per i vantaggi che essa offre:

- elevato calore specifico;
- ottimo coefficiente di scambio.

La pompa assorbe una potenza (Kw) proporzionale alla quantità di calore trasferita nell'unità di tempo. Si definisce "coefficiente di efficienza" della pompa di calore (C.O.P.) o coefficiente of performance, il rapporto tra la potenza (Q) fornita all'involucro edilizio e la potenza elettrica assorbita (Kw):

$$\text{C.O.P.} = Q \text{ (Kcal/h)} / 860 \times \text{Kw}$$

Come sorgente di calore, possono essere prevalentemente utilizzate:

- acqua di pozzo;
- acqua di falda;
- acqua superficie;
- acque reflue da impianti di depurazione;
- aria ambiente.

Pertanto, a seconda delle soluzioni adottate, si hanno:

- pompe di calore acqua/acqua;
- pompe di calore aria/acqua;
- pompe di calore aria/aria.

Nei due casi affrontati sono previste pompe di calore aria-acqua, che alimentano i circuiti di impianti a pannelli radianti a pavimento.

### 11. Cenni sui costi di realizzazione

È davvero difficile stabilire dati medi significativi in merito ai costi richiesti per realizzare gli impianti a pannelli, per i due casi studio, in quanto molteplici sono le variabili da prendere in considerazione:

- la resistenza termica del pavimento;
- il costo dei materiali isolanti da porre sotto i pannelli;
- il costo e la qualità del tubo costituente i pannelli.

Usualmente si stima che gli impianti a pannelli hanno un costo aggiuntivo, mediamente del 10-30% rispetto agli impianti a radiatori con regolazione climatica.

Mentre per i costi di gestione, tali impianti, consentono risparmi variabili del 10 al 15% rispetto agli impianti tradizionali, pertanto consentono di ammortare in tempi relativamente brevi, il maggiore costo sostenuto per la loro realizzazione.

Nel nostro caso è stato fatto una stima dei costi di gestione per l'impianto di climatizzazione del Castello Chiaramonte di Favara, tenuto conto che il volume riscaldato è  $V = 10.605 \text{ m}^3$  e la potenza termica ( $Q = 60 \text{ Kw}$ ), si ottengono rispettivamente i seguenti costi:

COMBUSTIBILE	COSTI (EURO)
Gasolio	21.759
Metano	15.483
Energia elettrica	8.640

con un netto vantaggio economico nei confronti del sistema a pompe di calore.

Per quanto riguarda il costo di realizzazione di un sistema radiante a pavimento, oscilla tra 47-67 euro/m<sup>2</sup>, posto in opera ed escluso il massetto soprastante. Questo sistema costa circa 60-70% in più di un sistema tradizionale (la serpentina più i pannelli) costo di circa 25-35 euro/m<sup>2</sup>, che dipende anche dai materiali utilizzati, cui occorre aggiungere il costo per lo smontaggio o demolizione della pavimentazione, la coibentazione/impermeabilizzazione del massetto.

## 12. Conclusioni

Per un corretto approccio al tema del controllo ambientale dei beni museali, è necessario non solo dotare l'involucro edilizio di sofisticati impianti di controllo ambientale, quanto piuttosto conoscere le condizioni ambientali effettivamente esistenti e stabilire, prima di qualsiasi intervento impiantistico, se vi sia o meno compatibilità fra tali condizioni ambientali e la conservazione dei manufatti. Da qui l'importanza che ha assunto il monitoraggio ambientale, quale strumento di controllo per l'elaborazione dei dati acquisiti e l'interpretazione che di essi viene fatta. L'analisi della complessa interazione tra la dinamica delle condizioni climatiche, la necessità di conservare i "beni museali" in condizioni di massima stabilità, le problematiche sul benessere tecnico relativo all'utenza, fruitore degli spazi espositivi, la tipologia costruttiva dell'involucro ed infine la necessità di dover fare fronte alle peggiori condizioni climatiche, ha vincolato la scelta impiantistica.

## REGESTO STORICO

### Appendice 1

#### Castello Chiaramonte di Favara (Ag)

È uno dei primi esempi di arte del '300 siciliano, ad opera della famiglia Chiaramonte (di origine francese: Clermont), in quel secolo la omonima famiglia raggiunse grande potere politico ed esercitò il proprio dominio feudale su buona parte della Sicilia per tutto il corso del XIV secolo. L'influenza dei Chiaramonte fu tale che tutto il secolo è ricordato, nella storia della Sicilia, come "epoca chiaramontana", e si estende anche all'ambito dell'architettura e dell'arte del periodo che, riprendono temi e motivi dell'architettura normanna, sviluppa un caratteristico stile, detto "Chiaramontano".

Il primo esempio occidentale nel quale la lezione architettonica-militare orientale si dimostra intelligentemente accolta e rifiuta in forme anche esteticamente originali, è costituito dalla rete dei castelli siculo-pugliesi. Con la loro

planimetria simmetrica e regolare e nel loro rapporto preciso con l'ambiente circostante (si tratta di castelli urbani, sede di funzionari o di guarnigione), sorgono in funzione di una struttura statale accentrata (Figura 27a, b, c a colori, p. 223).

#### IMPIANTO PLANIMETRICO

Il Castello presenta le caratteristiche tipiche di insediamento fortificato, a carattere residenziale, si sviluppa in un impianto planimetrico quadrangolare, in stile severo, con un volume nitido e chiuso, l'edificio è incentrato attorno ad un raccolto cortile. Esso fu costruito negli ultimi decenni del sec. XIII, tra la fine dell'epoca Svevo-angioina e l'inizio dell'epoca Aragonese, per volere di Federico II Chiaramonte.

La mole originaria dell'impianto, rispetto alla configurazione odierna, risultava di più imponente visione, in quanto comprendeva un altro forte con mura merlate conclusi agli angoli con quattro torri (di cui una demolita insieme alle mura di cinta dopo il 1820).

La configurazione attuale del Castello: dall'attuale ingresso si passa all'androne, che era l'antico ingresso a cui si accedeva direttamente alla corte interna, che serve a disimpegnare tutti i locali del piano terra. Ad Est della corte si sviluppano tre piccoli locali adibiti prima a cucina e successivamente a carceri, nel lato Nord si trova un piccolo locale adibito a dispensa.

Nel lato Ovest si snoda nella sua interezza una sala che in principio era adibita a stalla. Da una scala che si sviluppa nel lato Ovest della corte interna si accede al primo piano attraverso una loggia coperta da una volta decorata da un fregio di stile chiaramontano, che si riallaccia allo stile Arabo-normanno. Successivamente nel 500, la loggia venne modificata con una bifora in stile rinascimentale. Direttamente dalla loggia si accede alla stanza del Crocifisso: le colonne ottagonali dalla quale si dipartono i costoloni della volta a crociera che copriva la stessa. Adiacentemente alla stanza del Crocifisso vi si trova la Cappella, la parte più nobile e artisticamente la più qualificante, essa è divisa in due parti da un arco sostenuto da due colonne sormontate da capitelli con foglie d'acanto. La prima parte della cappella è coperta da una cupola che all'esterno si manifesta di forma irregolare, mentre all'interno è costituito da una serie di cocci calcarei perfettamente quadrati.

Superato il presbiterio al centro nella parete di fondo, ricavata nello spessore del muro, l'abside semicircolare con feritoia centrale fiancheggiata da colonnine.

Il portale di ingresso è sormontato da un fastoso portale ogivale, decorato in pietra bianca, raffigurante antiche bighe romane. Al piano nobile il salone di rappresentanza e l'abitazione del signore.

## Appendice 2

### Chiesa di San Matteo

Ruggero I Conte di Sicilia, nel giorno dedicato a San Matteo Apostolo, ricevette il giuramento di fedeltà e di soggezione dei palermitani, che lo acclamarono loro Re. In memoria di questo avvenimento, fra le prime fondazioni, eresse la Chiesa ed il monastero di San Matteo, con monache Brasiliane.

La Chiesa del "glorioso San Matteo il vecchio" fu fabbricata nel 1088 da Augusto Ruggero Normanno, e solennemente consacrata nel 1113.

Ospitò il primo nucleo di frati Domenicani, appena giunti a Palermo e fu inglobata nella struttura di S. Caterina. Il tempio, nella sua configurazione attuale, fu costruito con le laute elemosine raccolte da fra Leonardo Galici tra il 1634 ed il 1647 (Figura 28a, b, c a colori, p. 224-225 e Figura 29).

#### IMPIANTO PLANIMETRICO

L'interno mantiene un impianto ancora rinascimentale con pianta basilicale a tre navate, transetto e cappellone rettangolare; all'incrocio del transetto con la navata si erge la cupola. Nel XVIII secolo la chiesa venne arricchita da rivestimenti parietali in marmo, decorazioni pittoriche e a stucco che ne fanno un tempio prettamente barocco.

**Note**

- <sup>1</sup> Es.: conservazione del legno, esposizione alla luce di terrecotte o vetri.
- <sup>2</sup> Castello di Venaria; Galleria Diana; Castello di Udine; Chiesa di S. Stefano a Mariano Comense, Corno; Chiesa di Onara a Tombolo Padova; Chiesa di S. Giuseppe a Padova; Galleria Meravigli a Milano; Planetario a Roma; Museo Egizio a Torino.
- <sup>3</sup> La conservazione, talvolta trascurata, è un obbligo tassativo, previsto dalla legge italiana (DLg. 22/01/2004, n. 42 "Codice dei beni culturali e del paesaggio, ai sensi dell'art. 10 della legge 6/07/2002, n. 137" G.U. n. 45 del 24/02/2004, S.O. n. 28): "I beni culturali non possono essere distrutti, danneggiati" (art. 20). "La tutela consiste nel... garantire la protezione e la conservazione per fini di pubblica conservazione" (art. 3).
- <sup>4</sup> Grandezze acquisibili attraverso la centralina può agevolmente ospitare diversi sensori. Le grandezze che più comunemente si possono rilevare sono:
- temperatura;
  - umidità relativa;
  - flusso termico;
  - radiazione;
  - illuminamento;
  - pressione atmosferica, differenziale;
  - velocità dell'aria;
  - concentrazione di gas;
  - rumore;
  - Ph.

*Gli strumenti Babuc sono inoltre predisposti per ospitare sensori di altro tipo per ricevere segnali analogici standard.*

**Summary**

This paper presents a line of research aimed at studying in detail the interaction between air conditioning/heating systems and thermo hygrometric conditions inside museums.

An experimental test was carried out on the microclimatic conditions inside a building envelope, using as case studies the interiors of the Castle of Chiaramonte in Favara (Agrigento), and the Church of Saint Matthew (Palermo). In this phase of the work the "real" measured values and the recommended "optimal" values were compared for the various museum exhibits displayed.

The analysis of the complex dynamic interaction of climate conditions, the need for the museum pieces to be preserved in a situation of maximum stability, the problems regarding thermal comfort in relation to users' enjoyment of the exhibition space, the construction model of the building envelope – the synergy between all these variables led to establishing the final design project. This consists of an air conditioning system with radiant panels, floor heating, cooling system and primary air, in which the benefits seen from an environmental and energy point of view, are fully explained.

The conservation of cultural heritage collections in museums, on the one hand implies that the attention of the specialists must turn to the prevention of the natural degradation caused through time and on the other to improve the quality of the environment. This means environmental parameters must be checked and monitoring techniques used. Since the connective tissue between the museum and its container is the environment, the building-plant system must be held responsible for the "degradation suffered by the museum itself" or "be largely responsible for its optimal conservation with the passing of time".

**Riassunto**

Nel presente lavoro si espongono le linee di una ricerca tesa ad approfondire le interazioni tra impianti di climatizzazione e le condizioni termoigrometriche all'interno degli spazi museali.

È stata effettuata una verifica sperimentale delle condizioni microclimatiche all'interno dell'involucro edilizio ed in particolare all'interno del: Castello Chiaramonte di Favara (Ag), e della Chiesa di San

Matteo (Pa). In questa fase di lavoro sono stati confrontati i valori misurati “reali” con quelli “ottimali” consigliati per i vari beni museali esposti.

L'analisi della complessa interazione dinamica delle condizioni climatiche, la necessità di conservazione dei beni museali in condizioni di massima stabilità, le problematiche sul benessere termico relativo all'utenza fruitore degli spazi espositivi, la tipologia costruttiva dell'involucro edilizio, la sinergia fra queste variabili ha condotto ad una scelta progettuale consistente in un impianto di climatizzazione a pannelli radianti ed area primaria, descrivendone i vantaggi sia dal punto di vista ambientale che energetico.

La conservazione del patrimonio culturale, raccolto nei musei, implica un'azione di prevenzione nei confronti del degrado indotto dal tempo e dalla qualità dell'ambiente, con il controllo dei fattori e degli agenti nonché delle tecniche di monitoraggio. Essendo l'ambiente il tessuto connettivo tra il bene museale e il suo contenitore, il sistema edificio-impianto è da ritenere pertanto il maggiore imputato del “degrado subito dal bene stesso” oppure “il maggiore artefice della sua ottimale conservazione nel tempo”.

## Résumé

Dans le travail présent, on expose les lignes d'une recherche visant l'approfondissement des interactions entre installations de climatisation et les conditions thermohygro-métriques à l'intérieur des espaces des musées.

On a effectué une vérification expérimentale des conditions microclimatiques à l'intérieur de l'enveloppe du bâtiment et en particulier à l'intérieur du: Château de Chiaramonte di Favara (Ag), et de l'Église de San Matteo (Pa). Dans cette phase de travail ont été confrontées les valeurs mesurées “réelles” avec les valeurs “optimales” conseillées pour les différents biens des musées exposés.

L'analyse de la complexe interaction dynamique des conditions climatiques, la nécessité de conservation des biens des musées en conditions de stabilité maximum, les problématiques sur le bien-être thermique relatif aux usagers qui jouissent des espaces d'exposition, la typologie constructive de l'enveloppe du bâtiment, la synergie entre ces variables a amené à un choix conceptuel consistant en une installation de climatisation à panneaux radiants et aire primaire, en décrivant les avantages tant du point de vue environnemental qu'énergétique.

La conservation du patrimoine culturel, recueilli dans les musées, implique une action de prévention vis-à-vis de la dégradation induite par le temps et par la qualité de l'environnement, avec le contrôle des facteurs et des agents ainsi que des techniques de monitoring. Étant donné que l'environnement est le tissu connectif entre le bien des musées et son conteneur, le système édifice-installation doit être considéré comme le plus grand accusé de la “dégradation subie par le bien même” ou bien “le plus grand acteur de sa conservation optimale au cours du temps”.

## Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden die Linien einer Untersuchung aufgerissen, die die Interaktionen zwischen Klimaanlage und der thermohygro-metrischen Situation in Museumsräumen eingehender beschreibt.

Es wurde eine experimentelle Überprüfung der mikro-klimatischen Bedingungen im Inneren der Gebäudehülle vorgenommen, und zwar im Kastell Chiaramonte in Favara (Provinz Agrigento) und in der Kirche San Matteo (Palermo). In dieser Arbeitsphase wurden die “realen” Messwerte mit den “optimalen” Werten verglichen, die für die verschiedenen Museumsexponate empfohlen werden.

Die Analyse der komplexen dynamischen Interaktion der klimatischen Bedingungen, die Notwendigkeit der Konservierung der Museumsgüter in einem Zustand der maximalen Stabilität, die Probleme einer angenehmen Temperatur für die Besucher der Ausstellungsräume, die Bauweise der Gebäudehülle und die Synergie zwischen diesen Variablen haben zu einer Projektentscheidung geführt, die in einer Klimatisierung mit Fußbodenheizung und Primärluft besteht, deren Vorzüge hinsichtlich Umweltfreundlichkeit und Energieersparnis beschrieben werden.

Die Konservierung des in den Museen gesammelten kulturellen Erbes verlangt eine vorbeugende

Aktion gegen den Verfall, der durch die Zeit und die Qualität der Umgebung verursacht wird, mit Kontrolle der Faktoren und Einwirkungen sowie der Überwachungstechniken. Da der umgebende Raum das verbindende Element zwischen dem Museumsgut und seinem Bau ist, muss das System Gebäude/Klimaanlage entweder als "der Hauptschuldige am Verfall des Gutes" oder als "der wichtigste Garant seiner optimalen langfristigen Erhaltung" angesehen werden.

## Resumen

En el presente trabajo se exponen las líneas de una investigación que se plantea profundizar en las interacciones entre equipos de climatización y las condiciones termohigrométricas dentro de los espacios museales.

Se ha efectuado una comprobación experimental de las condiciones microclimáticas dentro del edificio contenedor, y en particular dentro del: Castillo Chiaramonte di Favara (Agrigento) y de la Iglesia de San Mateo (Palermo). En esta fase del trabajo se han comparado los valores medidos "reales" con los "ideales" aconsejados para los distintos bienes museales expuestos.

El análisis de la compleja interacción dinámica de las condiciones climáticas, la necesidad de conservación de los bienes museales en condiciones de máxima estabilidad, las problemáticas sobre el bienestar térmico en relación con el uso que se hace de los espacios expositivos y el tipo de construcción del edificio contenedor; la sinergia entre estas variables ha llevado a una solución proyectual consistente en un equipo climatizador de paneles radiantes y área primaria, describiendo sus ventajas tanto desde el punto de vista ambiental como energético.

La conservación del patrimonio cultural, recogido en los museos, implica una acción de prevención en relación con el deterioro causado por el tiempo y la calidad del ambiente, el control de los factores y agentes, así como de las técnicas de monitorización. Dado que el ambiente constituye el tejido conjuntivo entre el bien museal y su contenedor, el sistema edificio-instalación debe considerarse por tanto el principal encausado del "deterioro sufrido por el bien" o "el principal artífice de su excelente conservación a lo largo del tiempo".

## Резюме

В настоящей работе излагаются линии исследования, стремящегося изучить взаимодействие между установками кондиционирования воздуха и термогигрометрическими условиями в музейных помещениях.

Была проведена экспериментальная проверка микроклиматических условий внутри строительной оболочки, а в особенности внутри Замка Кьярамонте ди Фавара (область Агридженто) и Церкви Сан-Маттео (Св. Матвея) (Палермо). На этом этапе работы были сопоставлены "реальные" измеренные значения с "оптимальными", рекомендуемыми для различных музейных экспонатов.

Анализ сложного динамического взаимодействия климатических условий, необходимость сохранения музейного имущества в условиях максимальной стабильности, проблемы термического благосостояния, применительно к посетителям - пользователям выставочных помещений, конструктивная типология строительной оболочки, синергия между этими переменными привела к выбору проекта, состоящего из кондиционирующей установки с излучающими панелями и первичной зоны, описывая их преимущества, как с точки зрения окружающей среды, так и энергетической.

Сохранение собранного в музеях культурного имущества подразумевает деятельность предотвращения деградации, вызванной временем и качеством окружающей среды, с контролем факторов и агентов, а также техники мониторинга. Поскольку среда является соединительной тканью между музейным экспонатом и его контейнером, следует считать систему здание - кондиционирующая система главным фактором ответственным за "деградацию, которой подвержены сами экспонаты" или "главным ответственным за его оптимальную сохранность во времени".