

Riccardo Paolini\*, Lavinia C. Tagliabue\*\*, Elisabetta Rosina\*, Maryam MeshkinKiya\*, Enrico De Angelis\*,

\*Department of Architecture, Built environment and Construction engineering, Politecnico di Milano, Italia

\*\*Department of Civil, Environmental, Architectural Engineering and Mathematics, Università di Brescia, Italia

riccardo.paolini@polimi.it

lavinia.tagliabue@unibs.it

elisabetta.rosina@polimi.it

maryam.meshkinkiya@polimi.it

enrico.deangelis@polimi.it

**Abstract.** La qualità degli spazi interni è fortemente legata alle condizioni igrotermiche che influenzano il comfort degli utenti e i rischi di conservazione del patrimonio edilizio. Inoltre, una gestione incurante di spazi espositivi con numerosi accessi può causare carichi eccessivi di umidità, e conseguenti fenomeni di degrado. In questo lavoro, è stata considerata una sala espositiva rappresentativa del patrimonio costruito. Il rischio di proliferazione biologica è indagato nelle condizioni climatiche di Milano e Barcellona, con diversi ratei di ventilazione e numero di visitatori. I risultati delineano la necessità di politiche informate da analisi avanzate per prevenire il rischio igrotermico, in assenza di impianti, che non è sempre possibile integrare nel patrimonio edilizio storico.

**Parole chiave:** Umidità, Proliferazione biologica, Conservazione, Sistema di gestione integrata, Cambiamento climatico

## Introduzione

Gli scambi di calore e di umidità possono essere valutati attraverso modelli numerici e l'analisi è sicuramente rilevante per gli edifici storici (Kramer et al., 2013). La superficie esterna, soprattutto di edifici in muratura e pietra porosa, è particolarmente soggetta all'impatto della pioggia portata dal vento (Abuku et al., 2009), nonché altre influenze atmosferiche che facilitano i meccanismi di alterazione e quindi di degrado, tra cui l'invecchiamento e lo sporcamento (Leissner et al., 2015; Brimblecombe & Grossi, 2005). Sulla superficie interna, il rischio è per lo più legato alla crescita biologica principalmente influenzata dalle condizioni interne. La valutazione del rischio di conservazione è ulteriormente complicata dai cambiamenti climatici, che, ad esempio, aggiungono l'incertezza sulle soglie di gelo-disgelo in una determinata area (Grossi et al., 2007). Tra gli eventi estremi, ondate di calore (ad esempio, l'estate del 2003 e il 2015 in Europa Continentale) o, d'altra parte, le precipitazioni estreme (ad esempio, l'estate 2014

nel Nord Italia) sono esempi di anomalie climatiche che possono compromettere drasticamente gli ambienti naturali e costruiti locali (van Schijndel & Schellen, 2013; Pieri et al., 2016). Deviazioni igrotermiche dalle condizioni di esercizio medie possono portare a una pluralità di gravi rischi per il patrimonio costruito (Ashley-Smith et al., 2013), come la proliferazione biologica, o il degrado attivato dall'assorbimento della pioggia portata dal vento o, per esempio, le variazioni dimensionali di murature in argilla a causa di cicli di deformazione per umidità (Ramezani & Jeong, 2011). Anche se è prassi fare riferimento all'umidità relativa, bisognerebbe in effetti considerare l'umidità assoluta o specifica (Leissner et al., 2015). Huijbregts et al. (2012a) hanno discusso gli impatti delle variazioni di umidità sul degrado biologico, chimico e meccanico di artefatti museali, e hanno visto che le precipitazioni come le variazioni di umidità hanno effetti di natura diversa sulle condizioni interne, e quindi sulla conservazione. Martens & Schellen (2008) sostengono che alti livelli di umidità relative ambientale sono fra i fattori più importanti che influiscono sulla proliferazione biologica sui manufatti, e che le fluttuazioni di umidità possono aumentare il rischio di degrado dovuto ad azioni meccaniche. Huijbregts et al. (2012b) hanno dimostrato che il livello di proliferazione biologica dipende sia dalle condizioni esterne che dal set point degli impianti termici. Fornire condizioni di comfort negli edifici storici è anche un argomento di tendenza, che merita ulteriore ricerca, essendo fortemente influenzato dal comportamento dell'utenza, e normalmente è valutato solo con simulazioni igrotermiche (Künzel et al., 2009). In un contesto di cambiamenti climatici, la sfida è di consentire agli spazi di fornire agli utenti comfort e buona qua-

Application of  
biological growth  
risk models to the  
management of built  
heritage

**Abstract.** The quality of the interior spaces is strongly related to the hygro-thermal conditions which affect the users' comfort, and may yield to preservation risk for the built heritage. Moreover, careless management of exposition spaces with excessive occupancy may result in moisture loads that promote degradation. In this paper, as a case study, an exposition hall representative of the built heritage is considered. The microbiological growth risk is investigated at two different climate conditions, namely Milan and Barcelona, considering varying ventilation rates and number of visitors. The results outline the need of policies informed by advanced analyses to prevent hygro-thermal risk in the absence of dedicated building services, that cannot always be integrated in built heritage.

**Keywords:** Moisture, mold, conservation, integrated management scheme, climate change

## Introduction

Heat and moisture exchanges may be evaluated through numerical models and the analysis could be definitely important in historical buildings (Kramer et al., 2013). At the exterior surface, this is relevant for masonry and porous stone buildings, that are particularly subject to the impact of wind driven rain (Abuku et al., 2009), as well as other atmospheric influences that facilitate alteration mechanisms and therefore degradation, among which weathering and soiling play a relevant role (Leissner et al., 2015; Brimblecombe & Grossi, 2005). At the interior surface, the risk is mostly related to biological growth mainly influenced by the indoor conditions. The risk assessment is further complicated by climate change, which, for instance, adds uncertainty to the thresholds for freeze-thaw in a specific area (Grossi et al., 2007). Among

extreme events, heat waves (e.g., the summers of 2003 and 2015 in Continental Europe) and extreme rainfalls (e.g., the summer of 2014 in Northern Italy) are examples of climate anomalies that may impair dramatically the local natural and built environments (van Schijndel & Schellen, 2013; Pieri et al., 2016). Hygro-thermal deviations from the average operating conditions may lead to a plurality of major risks to the built heritage (Ashley-Smith et al., 2013), such as mold proliferation, or degradation modes activated by wind driven rain absorption or, for instance, swelling of clay masonry due to hygro-thermal strain cycles (Ramezani & Jeong, 2011). While focusing on relative humidity is mostly popular, the mixing ratio or the specific humidity should be regarded instead (Leissner et al., 2015). Huijbregts et al. (2012a) discussed the impacts of relative humidity variation



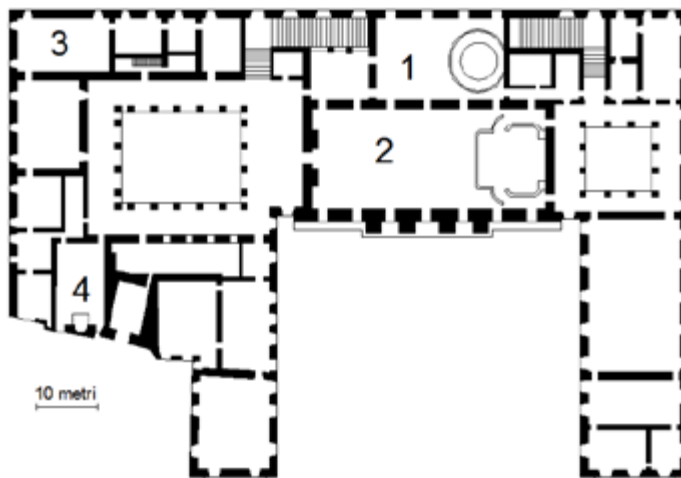
lità dell'aria (Aste et al., 2016), e allo stesso tempo minimizzare il rischio igrotermico nel contesto della promozione culturale e dell'implementazione sociale in una pianificazione granulare dei luoghi diffusi (Huijbregts et al., 2013a; Rajcic, 2013). Per un patrimonio storico e artistico in pericolo, un efficace schema di strategie per stimare il rischio di crescita biologica è fondamentale per sostenere i piani di gestione per l'utilizzo dell'edificio e la conservazione del valore (Huijbregts et al., 2013b).

Questo studio introduce la valutazione del rischio igrotermico per sale espositive museali. La valutazione dei rischi è effettuata per mezzo di simulazioni del trasporto di calore e umidità, considerando diversi ratei di cambio d'aria, e un diverso numero di visitatori.

### Metodo

Questo lavoro analizza uno spazio museale tramite simulazioni dinamiche di scambio termico e trasporto di umidità, attraverso il software WUFI Plus 3.1 (Künzel, 1995; Antretter et al., 2011), conforme alla norma EN 15026 (CEN 2007a). Il modello calcola l'equilibrio entalpico con il metodo dei volumi finiti di controllo, considerando lo scambio termico accoppiato al trasporto di umidità liquida e in fase di vapore, i cambiamenti di fase, la dipendenza dall'umidità e dalla temperatura delle proprietà di trasporto termiche e di umidità. Le simulazioni sono state eseguite dal 01/01/2012 al 31/12/2015, inizializzando il modello con i dati del 2011, con intervallo orario. Il rischio di crescita biologica è valutato con il modello di Sedlbauer (2001), che calcola un indice fra zero e sei, dove zero significa proliferazione nulla, e sei completa copertura della superficie da parte delle muffe. L'indice massimo di muffa accettabile è di 1 che corrisponde a una crescita di 50 mm per anno (Vereecken & Roels, 2012). L'ambiente valutato è

Questo lavoro analizza uno spazio museale tramite simulazioni



una sala espositiva (6 m x 10 m in pianta e altezza interna di 4.20 m), inteso come parte di un edificio storico, con un solo lato esposto alle condizioni interne e quattro finestre (ciascuna di 1.20 m x 0.70 m), le cui caratteristiche sono rappresentative delle costruzioni storiche italiane (Fig. 1). I componenti edilizi che delimitano

on biological, chemical and mechanical degradation of museum objects. They argued that precipitation and relative humidity fluctuations have different effects on indoor climate that follows various damage risks. Martens and Schellen (2008) concluded that "long-term high relative humidity" is among the most important factors that affect fungal growth on museum objects, and they also found that the fluctuations of relative humidity could increase the potential risk of mechanical degradation. Huijbregts et al. (2012b) showed that the total amount of fungal growth depends both on the outdoor climatic conditions as well as on the temperature set point of building services. Providing indoor comfort in heritage buildings is also trending topic, which merits further investigation, as it is strongly affected by human behavior and is usually tackled by hygro-thermal

simulations as suggested by Künzel et al. (2009). In a context of changing climates, the challenge is twofold: to enable spaces to both provide the users with comfort and good indoor air quality (Aste et al., 2016), and to prevent and reduce the hygro-thermal risk for the built heritage in the context of cultural promotion and social upgrade in a granular planning of diffused locations (Huijbregts et al., 2013a). Where the historical and artistic heritage is at danger, an effective scheme of strategies to estimate biological growth risk is fundamental to support management plans for building use and value preservation (Huijbregts et al., 2013b). This paper introduces the assessment of hygro-thermal risk for building spaces used as museum exhibition halls. The risk assessment is performed by means of heat and moisture transport simula-

tions, considering different air change rates, and different numbers of visitors.

### Method

A test space is analyzed with dynamic Heat and Moisture Transport (HMT) simulations, through the software WUFI Plus 3.1 (Künzel, 1995; Antretter et al., 2011), compliant with the standard EN 15026 (CEN 2007a). The model computes the enthalpy balance with the finite control volumes method, linking heat with liquid and vapor moisture transport, and accounting for phase changes, moisture and temperature dependency of the thermal and moisture transport properties. The simulations were run from 01/01/2012 to 31/12/2015, initialized with the weather of 2011, with hourly time step. The risk of biological growth is assessed with Sedlbauer's model (2001), with an index ranging between zero to

six, where zero means no growth, and six means total coverage. The maximum acceptable mold index is of 1 that equals to a growth of 50 mm per year (Vereecken & Roels, 2012). The space used for the evaluation is an exhibition hall (6 m x 10 m, with interior height of 4.2 m), intended as a part of a main historical building, with a single side exposed to outdoor conditions and with four windows (each of 1.20 m x 0.70 m), whose features may be a representative sample of the Italian historical heritage building stock (Figure 1). The building components delimiting the space are those typical of the Italian building stock (Ballarini et al., 2014), as detailed in table 1. The assumed value of solar absorbance is 0.5 and thermal emittance is 0.9, representative of a brick finished façade. The case study space has been analyzed in two different critical climate zones:

TAB. 1 | Caratteristiche dell'involucro e proprietà. SHGC è il fattore solare  
*Envelope features and thermal characteristics. SHGC is the solar heat gain coefficient*


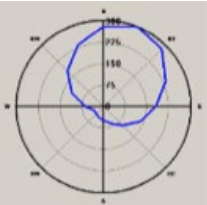
TAB. 2 | Zone climatiche selezionate per il caso di studio  
*Selected climate zones considered as location of the case study*

l'ambiente sono quelli tipici del patrimonio italiano (Ballarini et al., 2014), descritte in tabella 1. L'assorbimento solare è assunta pari a 0.5 e l'emissività termica pari a 0.9, valori rappresentativi per una facciata in laterizio con finitura. Il caso di studio è stato analizzato nelle condizioni climatiche di Milano, e di Barcellona, Spagna. Il clima urbano di Milano è descritto da una serie storica di dati meteo orari dal 2012 al 2015 misurati da una stazione presso il Politecnico di Milano. Per Barcellona, invece, i dati sono quelli del 2005, forniti dalla Agencia Estatal de Meteorología (Tab. 2).

La superficie esterna considerata è la facciata Nord, soggetta al deflusso d'acqua, e il carico di pioggia è stato calcolato secondo metodi riconosciuti (ASHRAE, 2009). I carichi termici interni sono dati dai visitatori, compresi fra 10 e 30 persone (persone/m<sup>2</sup>  $i_s = 0.16, 0.33, 0.5$ ) e ricambi d'aria sono correlati all'affollamento secondo i seguenti gradini: 1.4, 2.0, 2.9, 4.3, calcolati secondo nor-

Component	Description	Thermal transmittance U [W/m <sup>2</sup> K]	SHGC $g_{g,in}$
Wall	Solid brick masonry (50 cm)	1.14	-
Floor	Floor with wood beams and hollow brick	2.04	-
Ceiling	Ceiling with wood beams and hollow brick	2.86	-
Window	Single glass, metal frame without thermal break	5.7	0.85

TAB. 1 |

Climate	Position (Lat, long, altitude a.m.s.l.)	Air Temperature (°C) (min, mean, max)	RH (%) (min, mean, max)	Irradiation (kWh m <sup>-2</sup> y <sup>-1</sup> )	Rainfall (mm y <sup>-1</sup> )	Wind driven rain sum (mm y <sup>-1</sup> )
Milano Data series 2012-2015	45.47 N; 9.22 E; 153 m	-1.6; 14.5; 35.1	12; 63; 96	1338	987	
Barcelona Year 2005	41.30 N; 2.08 E; 6 m	2.04 -1.0; 16.3; 34.3	13; 67; 99	1619	513	

TAB. 2 |

mativa (CEN 2007b; UNI 2014). Il valore di 2.0 è assunto nell'ipotesi di un basso rateo di ventilazione, per uno spazio non gestito opportunamente. I carichi termici dovuti alle apparecchiature sono stati assunti pari a 4 W/m<sup>2</sup>. L'ambiente è utilizzato tutti i giorni, e le temperature di set point invernali ed estive sono rispettivamente pari a 20°C e 26°C.

## Risultati

A Milano non si ha alcuna proliferazione biologica se i ricambi d'aria sono in funzione del numero di visitatori, mentre il fenomeno si verifica con un forte affollamento (30 visitatori) e bassa ventilazione (cioè 2.0) inadatta al numero degli occupanti (Fig. 2a). In questo caso l'indice di rischio di proliferazione biologica è pari a 3 (cioè il 50% della superficie è coperto). Nel clima di Barcellona, non si verifica proliferazione biologica con basso affollamento ( $i_s = 0.16$ ) e ricambio di 2.0 volumi ora (Figura 2b). Nel caso di 1.4 ricambi d'aria all'ora, la crescita biologica rimane sotto il livello di 0.5, mentre con maggiore affluenza ( $i_s = 0.33$ ) l'indice cresce da 1.7 a 2.7 negli ultimi anni (ossia con l'aumento del livello di umidità e precipitazioni). Un elevato affollamento ( $i_s = 0.5$ ) determina un indice superiore a 5, che arriva a 6 dalla fine del 2013 in poi. Ciò significa che il clima umido non consente uno sfruttamento intensivo dato da un programma fitto di visite con una ventilazione naturale. Va considerato che un valore di ricambi d'aria pari a 2.0 volumi ora è rappresentativo della comune gestione degli spazi espositivi. Il picco del rischio di proliferazione biologica a Milano si ha durante l'estate del 2014 (Fig. 2a), eccezionalmente piovosa

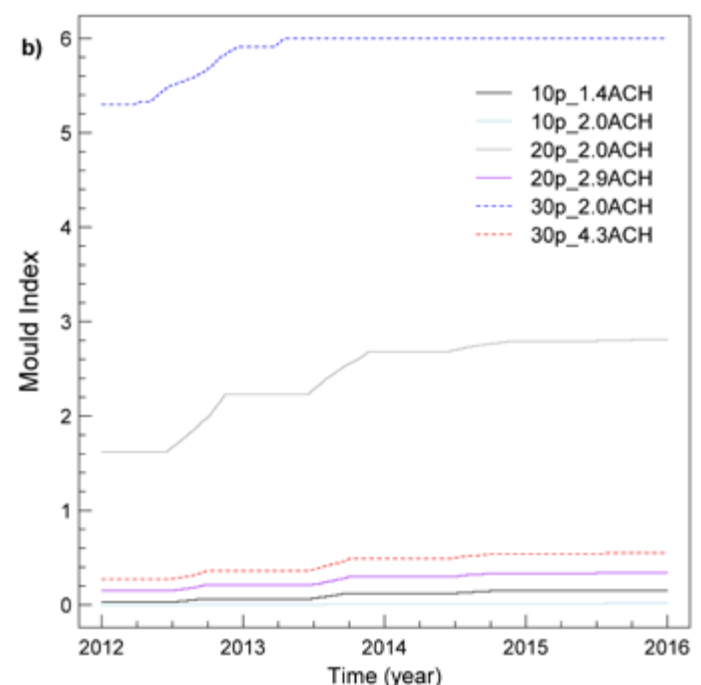
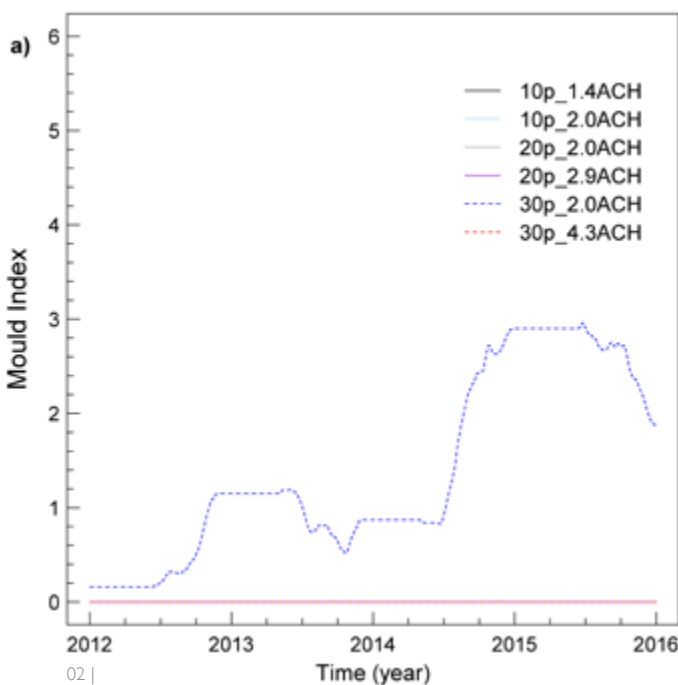
*Biological growth risk analysis (expressed as mould index) in Milan (a) and Barcelona (b). The number followed by p indicates the number of visitors, while ACH is the air change rate per hour of the considered volume*

e umido. Infatti, a Milano durante l'estate del 2014, le precipitazioni sono state pari a 520 mm da giugno ad agosto, mentre la media annuale negli ultimi dieci anni è di 800 mm, e la media del periodo è di 160 mm. Mentre, in climi italiani, in condizioni normali la pioggia battente dal vento ha un'influenza minima sulla proliferazione biologica sulla superficie interna delle pareti in muratura, eventi di pioggia estremi possono peggiorare il rischio. Infatti, a Milano, escludendo la pioggia battente, l'indice di rischio di proliferazione biologica massimo calcolato è di 1.2 anche con 30 persone e solo 2.0 ricambi d'aria all'ora. Tuttavia, sono necessari ulteriori approfondimenti per determinare se questo aspetto è rilevante anche per altre tipologie di muratura più spesse dei 50 centimetri della muratura in laterizio pieno qui considerata. L'effetto si estende fino a dopo l'estate del 2015, quando un'ondata di calore, e bassa umidità ambientale, contribuisce all'evaporazione dell'umidità accumulata. Infatti, durante l'estate del 2015 le temperature di picco dell'aria esterna hanno superato i 35°C e la minima umidità relativa esterna è stata inferiore al 20% (con una temperatura dell'aria tra i 32°C e 35°C), e in generale il 13% del tempo la temperatura dell'aria era superiore a 30°C e l'umidità relativa inferiore al 40%. Il tempo minimo per la germinazione delle spore è dibattuto (Vereecken e Roels, 2012), ma picchi di breve durata dovrebbero comportare un basso rischio. Con una temperatura dell'aria interna pari a 20°C e un'umidità relativa interna inferiore al 70% non si calcola alcun rischio di proliferazione biologica. Normalmente è sufficiente aumentare i ricambi d'aria, come ri-

chiesto dalle norme edilizie per gli spazi interni con elevati carichi di umidità (Dimitroulopoulou, 2012). Infatti, riducendo l'umidità relativa interna a valori inferiori al 70-75% (almeno per i valori a lungo termine) verrebbe anche eliminato il rischio di condensazione interstiziale, e quindi la necessità di un freno a vapore in caso di isolamento interno dopo un intervento di retrofit. Pertanto, i valori riportati possono essere considerati come intervalli di sicurezza.

### Discussione

Questa ricerca presenta strategie facili da implementare a un costo contenuto, come il piano di gestione del numero di visitatori consentiti contemporaneamente e del rateo di ricambio d'aria. Il monitoraggio e la gestione delle condizioni interne per mezzo di sensori e degli impianti dell'edificio sono generalmente considerati come la via più efficace e affidabile per gestire il patrimonio costruito di maggior valore e (Camuffo et al., 2002; Angelini et al., 2010). Tuttavia, a causa della mancanza di risorse finanziarie o vincoli tecnici nell'integrazione di impianti tecnici non è sempre possibile. La protezione dal rischio igrotermico è possibile anche senza impianti, e altri studi, per la Biblioteca Malatestiana di Cesena, Italia, sostengono che edifici del patrimonio storico senza impianti termo-meccanici possono avere una migliore conservazione (Fabbri & Pretelli, 2014), se l'ambiente interno è supportato da sensori che allertano circa il superamento di soglie di rischio. L'analisi presentata è preliminare rispetto alla realizzazione di una



rete di sensori, ed è pensata per fornire gli elementi utili a informare le strategie di gestione del patrimonio storico costruito. In particolare, è stata dimostrata la necessità di dati meteorologici dettagliati adatti per eseguire le analisi di rischio. Infatti, le simulazioni igrotermiche effettuate con serie di dati reali, al contrario di dati meteorologici da librerie di file attualmente disponibili, possono meglio evidenziare il rischio di conservazione in caso di anomalie climatiche, come durante l'estate piovosa del 2014 a Milano, seguita dall'ondata di calore dell'estate del 2015. Questa visione d'insieme non può essere ottenuta tramite campagne di monitoraggio in sito a breve termine, che sono comunque insostituibili e necessarie per calibrare un modello igrotermico per la simulazione dello specifico edificio. Inoltre, il confronto tra i casi di Milano e di Barcellona dimostra che le strategie di gestione e conservazione vanno sviluppate sulla base del microclima locale, e necessitano quindi di una progettazione supportata da dati climatici rappresentativi, di una validazione e calibrazione in loco.

Questo approccio è coerente con i progetti europei più recenti e in corso di svolgimento. Le anomalie climatiche possono alterare drasticamente la risposta igrotermica dell'involucro edilizio e influenzare la proliferazione biologica, e devono essere prese in considerazione quando si pianifica la conservazione del patrimonio costruito. Ciò è particolarmente importante in quanto la frequenza di tali eventi estremi sta aumentando con situazioni di picco opposte (es.: ondate di calore, precipitazioni estreme, etc.).

## Conclusioni

In questo lavoro è stato studiato per sale espositive museali l'impatto delle condizioni climatiche dell'ambiente esterno (urbano e secco o marino), anche in caso di anomalie climatiche, e dell'am-

Milan in Northern Italy, Po Valley, and Barcelona, in the north-east of Spain, on the seaside. Milan's urban climate is described by a hourly weather data series from 2012 to 2015 collected by a weather station in Politecnico di Milano, while Barcelona climate conditions are based on 2005 data from Agencia Estatal de Meteorología (Table 2).

The outdoor exposed surface is considered as an unprotected north facing façade, subject to runoff. The rain load is calculated accordingly to international procedures for unsheltered façades (ASHRAE, 2009). The indoor conditions are described by internal gains due to people varying from 10 to 30 with step of 10 people each (people/m<sup>2</sup>  $i_s = 0.16, 0.33, 0.5$ ) and the air changes are related to people density and surface going with the following steps: 1.4, 2.0, 2.9, 4.3 based on the relevant standards (CEN 2007b; UNI 2014).

The value of 2.0 is assumed in the hypothesis of a low ventilation rate due to unplanned and unmanaged indoor conditions. The internal gains related to appliances are set to 4 W/m<sup>2</sup> changing with occupancy. The space is daily used and the temperature set points are 20°C and 26°C respectively in winter and summer period.

## Results

In Milan no mold growth occurs when the air changes are adjusted based on people density (Figure 2a), while there is risk with a strong presence of people (maximum number of 30) and low ventilation (i.e., 2.0), that is unsuited to the number of occupants. In this case there is mold growth risk and the mold index is of 3 (i.e., 50% of covered surface) in hardly humid climate conditions. In Barcelona, mold growth does not occur in the case of low density of people

interio determinato dal numero di visitatori e ricambi d'aria. Il rischio di proliferazione biologica sulla superficie interna di edifici in muratura in ambienti urbani secchi, ad esempio a Milano, è modesto. Può essere rilevante solo in caso di ventilazione inadeguata, basata su ricambi d'aria con aria dall'ambiente esterno, non condizionata. Tuttavia, il rischio può essere notevolmente aumentato in caso di anomalie climatiche, come l'estate eccezionalmente piovosa del 2014 nel Nord Italia. In ambienti marini e caldi come quello di Barcellona, i metodi attivi, cioè gli impianti, appaiono come l'unica opzione praticabile per ridurre i livelli di umidità interna. Il controllo dell'umidità interna con la ventilazione o, se necessario, con la deumidificazione, sembra quindi l'unico mezzo efficace per controllare la proliferazione biologica se non è possibile definire una soglia rigida per il numero massimo di visitatori. La pianificazione della gestione degli spazi espositivi e museali potrebbe quindi utilizzare analisi igrotermiche dinamiche a supporto del processo decisionale. Questo approccio consente di evitare il decadimento prestazionale prolungare la vita utile e la durabilità del bene storico in una condizione di efficienza e benessere per i lavoratori e gli utenti. Pertanto, la mitigazione dei fattori di rischio igrotermico contribuisce a mantenere il valore storico e l'autenticità degli edifici, impedendo la sostituzione di tutte le parti a rischio di danni, come indicato nelle più aggiornate strategie di conservazione programmata e preventiva (Van Balen & Vandesande, 2013). Strumenti di simulazione avanzati potrebbero essere utili per migliorare un'analisi sistemica basata sulla simulazione dei flussi d'aria multi-zona e del trasporto di contaminanti (Wang, 2010), delle infiltrazioni multi-zona (Bojić & Kostić, 2006) e dei movimenti dei visitatori (Moulin et al., 2003). L'autorità per i Beni Storici potrebbe utilizzare il metodo di gestione proposto per l'organizzazione

( $i_s = 0.16$ ) and the 2.0 air change per hour (Figure 2b). With 1.4 air changes per hour the biological growth is lower than 0.5, while for higher density of people ( $i_s = 0.33$ ) the index grows from 1.7 to 2.7 in the last years (i.e. increased humidity level and rainfalls). High occupancy ( $i_s = 0.5$ ) determines an index greater than 5, reaching 6 from late 2013 and ongoing. This means that the humid climate does not allow a strong exploitation given by an intensely deployed schedule with a standard ventilation. However, in Milan the 2.0 air changes can be ascribed to commonly managed exposition spaces. It is interesting to note that the biological risk in Milan peaks during the summer of 2014 (Figure 2a), that was exceptionally rainy and humid. In fact, in Milan during the summer of 2014 the rainfall accounted for 520 mm from June to August, while the long-term yearly av-

erage is of 800 mm (in the last decade), and the period average is of 160 mm. While in normal conditions the wind driven rain has a minimal influence on the biological growth at the interior surface of masonry walls in Italian climates, extreme rain events may worsen the risk that is activated by the conditions in the indoor environment. In fact, in Milan, excluding the wind driven rain, the maximum computed mould index is of 1.2 also with 30 people and only 2.0 air changes per hour. However, further research is needed to determine if this aspect is relevant also for other masonry assemblies thicker than the 50 cm wall herein considered. The effect is extended till after the summer of 2015, with a dry heat wave contributing to the evaporation of stored moisture. In fact, during the summer of 2015 the peak outdoor air temperatures exceeded 35°C, and minimum

di eventi e mostre, preservando il patrimonio costruito storico e minimizzando il rischio igrotermico anche in un contesto di cambiamenti climatici.

## REFERENCES

Abuku, M., Janssen, H., Roels, S. (2009), "Impact of wind-driven rain on historic brick wall buildings in a moderately cold and humid climate: Numerical analyses of mould growth risk, indoor climate and energy consumption", *Energy and Buildings*, Vol. 41, pp.101-110.

Angelini, E., Grassini, S., Corbellini, S., Parvis, M., Piantanida, M. (2010), "A multidisciplinary approach for the conservation of a building of the seventeenth century", *Applied Physics A*, Vol. 100, pp.763-769.

Antretter, F., Sauer, F., Schöpfer, T., Holm, A. (2011), "Validation of a hygrothermal whole building simulation software", *Proceedings of 12th Conference of International Building Performance Simulation Association*, 14-16 November 2011, Sydney, Australia, pp. 1694-1701.

ASHRAE (2009), "ASHRAE Standard 160-2009. Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings", American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA, USA.

Ashley-Smith, J., Burmester, A., Eibl, M. (2013), "Climate for Collections - Standards and Uncertainties", *Proceedings of the Munich Climate Conference*, 7-9 November 2012, Munich, Germany, pp. 1-452.

Aste, N., Della Torre, S., Adhikari, R.S., Buzzetti, M., Del Pero, C., Leonforte, F., Manfren, M. (2016), "Sustainable church heating: The Basilica di Collemaggio case-study", *Energy and Buildings*, Vol. 116, pp. 218-231.

Ballarini, I., Corgnati, S.P. & Corrado, V. (2014), "Use of reference buildings to assess the energy saving potentials of the residential building stock: The experience of TABULA project", *Energy Policy*, Vol. 68, pp.273-284.

Bojić, M., Kostić, S. (2006), "Application of COMIS software for ventilation study in a typical building in Serbia", *Building and Environment*, Vol. 41, pp. 12-20.

outdoor relative humidity lower than 20% (with air temperature between 32°C and 35°C), and in general 13% of the time with air temperature higher than 30°C and relative humidity lower than 40%.

The minimum time for germination of spores is under debate (Vereecken & Roels, 2012), but peaks of short duration should result in a low risk. With an indoor air temperature of 20°C and relative humidity lower than 70% no mould growth risk is computed. Often increasing air changes is sufficient, as required by building codes for indoor spaces with high moisture loads (Dimitroulopoulou 2012). In fact, reducing the indoor relative humidity to values lower than 70-75% (at least long term values) would also eliminate the risk of interstitial condensation, and therefore the need of a vapor retarder in case of interior insulation after a retrofit.

Therefore, these may be regarded as safety intervals.

## Discussion

This research shows easily implementable and affordable strategies such as the management plan of the number of visitors allowed at the same time and of the air change rate. Monitoring and management of the indoor conditions by means of sensors and building services is generally regarded as the most effective and fail-safe option that is selected for built heritage of the highest value and vulnerability (Camuffo et al. 2002; Angelini et al. 2010). However, due to the lack of financial resources or technical constraints in the integration of building services this is not always possible. The preservation from hygrothermal risk is viable also without building services, and other studies, for the Malatestiana Library in Cesena, Ita-

Brimblecombe, P., Grossi, C.M. (2005), "Aesthetic thresholds and blackening of stone buildings", *Science of the Total Environment*, Vol. 349, pp.175-189.

Camuffo, D., Bernardi, A., Sturaro, G., Valentino, A. (2002), "The microclimate inside the Pollaiuolo and Botticelli rooms in the Uffizi Gallery, Florence", *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 3, pp.155-161.

CEN. (2007a), "EN 15026 2007. Hygrothermal performance of building components and building elements – Assessment of moisture transfer by numerical simulation", CEN, Brussels.

CEN. (2007b), "EN 15251. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics", CEN, Brussels.

Dimitroulopoulou, C. (2012), "Ventilation in European dwellings: A review", *Building and Environment*, Vol. 47, pp.109-125.

Fabbri, K., Pretelli, M. (2014), "Heritage buildings and historic microclimate without HVAC technology: Malatestiana Library in Cesena, Italy, UNESCO Memory of the World", *Energy and Buildings*, Vol. 76, pp.15-31.

Grossi, C.M., Brimblecombe, P., Harris, I. (2007), "Predicting long term freeze-thaw risks on Europe built heritage and archaeological sites in a changing climate", *Science of the Total Environment*, Vol. 377, pp.273-281.

Huïjbregts, Z., Schellen, H., van Schijndel, J. (2013a), "Computer modelling to evaluate the risks of damage to objects exposed to varying indoor climate conditions in the past, present, and future", *Proceedings of the 2nd Central European Symposium on Building Physics*, 9-11 September 2013, Vienna, Austria, pp. 335-342.

Huïjbregts, Z., Schellen, H., van Schijndel, J., Blades, N. (2013b), "Hygrothermal modelling of flooding events within historic buildings", *Proceedings of the 2nd Central European Symposium on Building Physics*, 9-11 September 2013, Vienna, Austria, pp. 491-498.

Huïjbregts, Z., Kramer, R., Martens, M., v. Schijndel, J., Schellen H. (2012a), "A proposed method to assess the damage risk of future climate change to museum objects in historic buildings", *Building and Environment*, Vol. 55, pp. 43-56.

ly, argue that heritage building without HVACs may have a better conservation (Fabbri & Pretelli, 2014), if the indoor environment is supported by sensors that alert about the trespassing of risk thresholds.

The research herein presented is preliminary to the deployment of a network of sensors, and is meant to inform the management strategies of built heritage. In particular, the need of suited detailed weather data to perform such assessments is addressed. In fact, hygrothermal simulations performed with real weather data series, opposed to weather data from currently available libraries, may better highlight the risks during climate anomalies, as shown for the case of Milan rainy summer of 2014 followed by the heat wave of 2015. This outlook cannot be achieved by onsite short-term monitoring campaigns, that are however irreplaceable, and neces-

sary to calibrate a hygro-thermal model to simulate a specific building. Moreover, the comparison between the case of Milan and that of Barcelona shows that the management and preservation strategy shall be developed based on the local microclimate, and needs appropriate design, on-site validation, and tuning.

This approach is consistent with recent and ongoing EU projects that follow this path of investigation. Climate anomalies can dramatically change the physical response of the building envelope, as well as the biological growth, and they need to be taken into account also when planning the preservation of built heritage. This is particularly important as the frequency of these extreme events is increasing with opposite peak situations (e.g. heat wave, heavy rainfalls higher than the average values, etc.).

Huijbregts, Z., Martens, M., Conen, K., Nugteren, I., v. Schijndel, J., Schellen, H.S (2012b), "Damage risk assessment of museum objects in historic buildings due to shifting climate zones in Europe", *Proceedings of the 5th International Building Physics Conference*, 28-31 May 2012, Kyoto, Japan, pp. 1271-1278.

Künzel, H.M. (1995), "Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components One- and two-dimensional calculation using simple parameters", Stuttgart, Germany, Fraunhofer IRB Verlag.

Künzel, H.M., Holm, A.H. (2009), "Moisture Control and problem analysis of heritage constructions" *Proceedings of PATORREB2009*, 10-18 March 2009, Porto, Portugal, pp. 85-102.

Kramer, R., van Schijndel, J., Schellen, H. (2013), "Inverse modeling of simplified hygrothermal building models to predict and characterize indoor climates", *Building and Environment*, Vol. 68, pp. 87-99.

Leissner, J., Kilian, R., Kotova, L., Jacob, D., Mikolajewicz, U., Broström, T., Ashley Smith, J., Schellen, H.L., Martens, M., van Schijndel, J., Antretter, F., Winkler, M., Bertolin, C., Dario Camuffo, D., Simeunovic, G., Vyhliđal, T. (2015), "Climate for Culture: assessing the impact of climate change on the future indoor climate in historic buildings using simulations", *Heritage Science*, Vol. 3, pp. 1-15.

Martens, M.H.J., Schellen, H.L. (2008) "A sound indoor climate for a museum in a monumental building", *Proceedings of Symposium Building Physics in honour of Prof. Hugo Hens*, October 2008, Leuven, Belgium, pp. 1-8.

Moulin, B., Chaker, W., Perron, J., Pelletier, P., Hogan, J., & Gbei, E. (2003), "MAGS Project: Multi-agent geosimulation and crowd simulation", *Proceedings of International Conference on Spatial Information Theory*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 151-168.

## Conclusions

The impact of different outdoor climate conditions (urban and dry, or maritime), as well as that of climate anomalies and of the indoor climate determined by the number of visitors and air changes for exhibition halls was investigated. The mould growth risk at the interior surface of masonry buildings in dry urban environments, such as Milan's one, might be modest, and relevant only in case of unsuited ventilation, relying on air changes with unconditioned air from the dry outdoor environment. However, the risk may be dramatically increased by climate anomalies, such as the exceptionally rainy summer of 2014. In the case of maritime and warm environments such as that of Barcelona, active means to reduce the indoor moisture levels appear as the only viable option. Thus, controlling indoor relative hu-

midity with ventilation or, if needed, with de-humidification, seems the only effective mean to control mold growth if a strict threshold on the number of visitors is not acceptable.

The planning of the management of exhibition and museum spaces might therefore integrate dynamic hygrothermal simulation analyses to support the decision process. The framework has the advantage to prevent performance decay and to extend the useful life and durability of the historical asset in an efficient and healthy condition for the daily workers and the users. Therefore, the mitigation of the assessed risk factors contributes to maintain the historic value of the buildings and their authenticity, preventing the substitution of any parts under risk of damage, as stated by the most up to date strategy of planned and preventive conservation (Van Balen & Vandesande, 2013).

Pieri, L., Rondini, D., Ventura, F. (2016), "Changes in the rainfall-streamflow regimes related to climate change in a small catchment in Northern Italy", *Theoretical and Applied Climatology*, pp. 1-13. doi:10.1007/s00704-016-1834-6

Ramézani, H., Jeong, J. (2011), "Environmentally motivated modeling of hygro-thermally induced stresses in the layered limestone masonry structures: Physical motivation and numerical modeling", *Acta Mechanica*, Vol. 220, pp.107-137.

Sedlbauer, K. (2001). "Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components", Stuttgart, Germany, Fraunhofer IRB Verlag.

UNI. (2014), "UNI TS 11300-1. Energy Performance of Buildings – Part 1. Calculation of Energy Use for Space Heating and Cooling", UNI, Milan, Italy.

Van Balen, K., Vandesande, A. (Eds) (2013), "Reflection on preventive conservation, maintenance and monitoring", Acco. Leuven, Belgium, pp 1-172.

van Schijndel, J., Schellen, H. (2013), "The simulation and mapping of building performance indicators based on European weather stations", *Frontiers of Architectural Research*, Vol. 2, pp. 121-133.

Vereecken, E., Roels, S. (2012), "Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation", *Building and Environment*, Vol. 51, pp. 296-310.

Wang, L. (2010), "Using CFD Capabilities of CONTAM 3.0 for Simulating Airflow and Contaminant Transport in and around Buildings", *HVAC&R Research Journal*, Vol. 16, pp. 749-763.

Advanced and detailed simulation tools could improve a systemic analysis based on multi-zone airflow and contaminant transport simulations (Wang, 2010) jointly with multi-zone air infiltration modeling (Bojić & Kostić, 2006) and crowd motion simulation (Moulin et al., 2003). Heritage assets authority could use the proposed management approach to efficiently organize and schedule events and exhibitions, and at the same time preserve the built heritage minimizing the risk also in a context of changing climates.