



CIRIAF

Centro Interuniversitario di Ricerca
sull'Inquinamento e sull'Ambiente - "Mauro Felli"



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI PERUGIA

PERUGIA
12|04|19

XIX

Congresso Nazionale CIRIAF

ENERGIA E SVILUPPO SOSTENIBILE

ATTI



Lectio Magistralis

SHUJI NAKAMURA

Premio Nobel per la fisica nel 2014



Università
degli Studi di Perugia

AULA MAGNA

Piazza Università, 1 - Perugia

Con il patrocinio di



Con il contributo di



CIRIAF - Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento e sull'Ambiente - "Mauro Felli"
Università degli Studi di Perugia

XIX CONGRESSO NAZIONALE CIRIAF - Energia e Sviluppo Sostenibile - Atti
Perugia, 12 aprile 2019, Università degli Studi di Perugia, Aula Magna

Perugia: Morlacchi Editore University Press, 2019.
ISBN 978-88-9392-113-8 (online)

Impaginazione e progetto grafico di copertina:
Roberto Fiorella (CIRIAF - Università degli Studi di Perugia)

 L'edizione digitale on-line del volume è pubblicata ad accesso aperto su www.morlacchilibri.com.
La presente opera è rilasciata nei termini della licenza Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>). La licenza permette di condividere l'opera, nella sua interezza o in parte, con qualsiasi mezzo e formato, e di modificarla per qualsiasi fine, anche commerciale, a condizione che ne sia menzionata la paternità in modo adeguato, sia indicato se sono state effettuate modifiche e sia fornito un link alla licenza.

© 2019 Morlacchi Editore University Press

Pubblicato da Morlacchi Editore University Press, Piazza Morlacchi 7/9, 06123 Perugia
www.morlacchilibri.com

Temi Congressuali

- 1) Efficienza Energetica
- 2) Fonti e Sistemi Energetici Rinnovabili ed Alternativi
- 3) Nuove sorgenti luminose a LED e relative applicazioni
- 4) Qualità dell'Ambiente Costruito e Inquinamento Indoor
- 5) Edilizia sostenibile e bioarchitettura
- 6) Conservazione delle Opere D'Arte
- 7) Bilanci e Certificazioni Ambientali
- 8) Impronta ambientale
- 9) Mobilità Sostenibile
- 10) Politiche Energetiche ed Ambientali
- 11) Green economy e sostenibilità economico-sociale
- 12) Effetti sanitari dell'esposizione all'inquinamento ambientale

Comitato Organizzatore

Franco Cotana - Presidente

Francesco Asdrubali - Vice Presidente

Pietro Buzzini

Federico Rossi

Elisa Moretti

Mirko Filipponi

Andrea Presciutti

Marco Barbanera

Emanuele Bonamente

Paolina Cerlini

Elisa Belloni

Cinzia Buratti

Andrea Nicolini

Benedetta Turchetti

Beatrice Castellani

Gianluca Cavalaglio

Anna Laura Pisello

Valentina Coccia

Michele Goretti

Segreteria Organizzativa

Ilaria Castellini

Roberto Fiorella

Luca Fondacci

Serena Gallicchio

Leandro Lunghi

Giovanni Magara

Fabio Meattelli

Maria Angela Polverini

Francesco Strangis

Indice

Introduzione	p. IV
---------------------------	--------------

INTERVENTO DI APERTURA

Luce e luci nell'arte e nel restauro.	p. VI
---	--------------

Marco Ciatti

LECTIO MAGISTRALIS

Invention of High Efficient blue LED and Future Solid State Lighting.	p. VII
---	---------------

Shuji Nakamura

ARTICOLI SCIENTIFICI

New green paving systems for urban heat island and noise pollution mitigation.	p. 1
--	-------------

Ioannis Kousis, Luca Ercolanoni, Claudia Fabiani, Anna Laura Pisello

Indoor microclimatic study for book heritage preservation in historic buildings by experimental and numerical analysis: the case study of the Mario Marte library, Perugia, Italy.	p. 10
--	--------------

Elisa Moretti, Ettore Stamponi

A numerical model for the design of a climatic chamber for simulating moderate temperature and high humidity.	p. 24
---	--------------

Paolo Valdiserri, Eugenia Rossi di Schio, Valda Rondelli, Enrico Capacci

Experimental Investigation of Solar Reflectance Directional Dependence of Retroreflective Materials.	p. 32
--	--------------

Gabriele Battista, Roberto de Lieto Vollaro, Andrea Vallati

La manutenzione degli alvei fluviali per la prevenzione dei dissesti idrogeologici: quadro normativo, impatti socio-economici e ambientali, criticità e nuove opportunità per il territorio.	p. 39
--	--------------

Alessandro Petrozzi, Serena Gallicchio, Luca Fondacci, Francesco Strangis, Mattia Gelosia

The human perspective of green buildings: sample composition for energy saving potential in office buildings.	p. 46
---	--------------

Benedetta Pioppi, Chiara Crisanti, Cristina Piselli, Anna Laura Pisello

Esempio di BIM applicato ad un edificio storico ad elevate prestazioni energetiche.	p. 55
---	--------------

Jessica Romanelli, Matteo di Grazia, Augusto Gavagni, Francesco Strangis, Anna Laura Pisello, Franco Cotana

DATA DRIVEN DESIGN PER L'ARCHITETTURA IN LEGNO. Ricerche rappresentative di algoritmi evolutivi per l'ottimizzazione delle soluzioni multi-obiettivo. p. 61

Fabio Bianconi, Marco Filippucci, Giulia Pelliccia, Alessandro Buffi

Diagnosi e monitoraggio della riqualificazione di edifici storici secondo i principi dell'ecosostenibilità: la Certosa di Calci. p. 73

Fabio Fantozzi, Francesco Leccese, Giacomo Salvadori, Teresa Cervino

Wearable sensing techniques for investigating historical urban heat islands perceived by pedestrians. p. 86

Samuele D'Eramo, Ilaria Pigliautile, Cristina Piselli, Anna Laura Pisello

An overview on experimental investigations for thermal characterization of building walls. p. 95

Francesco Asdrubali, Luca Evangelisti, Claudia Guattari, Gino Moncada Lo Giudice

Experimental analysis and optimization of outdoor curtain materials for solar protection as a solution for urban heat island mitigation and thermal comfort improvement. p. 105

Marta Cardinali, Alberto Maria Gambelli, Cristina Piselli, Mirko Filipponi,

Beatrice Castellani, Andrea Nicolini, Federico Rossi

Development of a New Hydrothermal Carbonization Reactor with Renewable Energy Supply for Olive Pomace Treatment. p. 117

Francesco Micali, Barbara Mendecka, Lidia Lombardi, Arturo de Risi

Exergetic and environmental performance evaluations of a solar assisted adsorption chiller with thermal storage. p. 123

Barbara Mendecka, Gino Bella, Raffaello Cozzolino

Energy optimization of public lighting systems.

Assessment of the effects obtainable at urban scale. p. 131

Tullio de Rubeis, Dario Ambrosini, Domenica Paoletti

Carbohydrates recovery from cardoon pretreated by acid-catalyzed steam explosion and enzymatic hydrolysis. p. 143

Alessandro Bertini, Mattia Gelosia, Gianluca Cavalaglio, Marco Barbanera,

Tommaso Giannoni, Giorgia Tasselli, Andrea Nicolini, Franco Cotana

Effetti della mitigazione ambientale sull'efficienza dell'impianto termico. p. 154

Matteo Di Grazia, Cristina Piselli, Anna Laura Pisello

Architettura effimera per la ricostruzione. ANASTILOSIS (Con)temporanea.	p. 162
<i>Maria Federica Ottone, Enrica Petrucci, Dajla Riera</i>	
Prodotti a basse emissioni di carbonio: potenzialità e limiti della manifattura della regione Lazio.	p. 173
<i>Federico Orsini, Paola Marrone</i>	
Temperature estreme ed inquinamento atmosferico: l'area urbana di Roma.	p. 187
<i>Donatella Occhiuto, Silvia Barberini</i>	
Esposizione ad amianto: Innovativi approcci multimetodici per decifrare i meccanismi di azione patogenetici.	p. 200
<i>Paola Comodi, Patrizia Garofani, Valentina Dottorini, Luca Bartolucci, Umberto Susta, Azzurra Zucchini</i>	
Biomass vs coal ashes: resource or environmental issue?	p. 210
<i>Paola Comodi, Gianluca Cavalaglio, Andrea Nicolini, Costanza Cambi, Manuela Cecconi, Francesco Frondini, Azzurra Zucchini, Umberto Susta, Franco Cotana</i>	
Couette Vortex Formation and Topology in a Duct with an Embedded Cavity: A Possible Application in Flow Structures of Natural Systems.	p. 222
<i>Eugenia Rossi di Schio, Cesare Biserni, Andrea Natale Impiombato</i>	

XIX Congresso Nazionale CIRIAF

Energia e Sviluppo Sostenibile

Introduzione

Il Congresso Nazionale CIRIAF 2019 “ENERGIA E SVILUPPO SOSTENIBILE”, giunto alla XIX edizione, si è svolto il giorno 12 aprile 2019 nella prestigiosa sede dell’Aula Magna dell’Università degli Studi di Perugia.

Il CIRIAF (Centro Interuniversitario di Ricerca sull’Inquinamento e sull’Ambiente “Mauro Felli”), a cui afferiscono oltre 100 docenti universitari di 14 diversi Atenei, promuove da anni attività di ricerca interdisciplinare sui temi dell’inquinamento ambientale, dello sviluppo sostenibile, delle fonti energetiche rinnovabili e alternative, della pianificazione energetica, della mobilità sostenibile, degli effetti sanitari e socio-economici dell’inquinamento ambientale.

Il Congresso Nazionale CIRIAF 2019, giunto alla diciannovesima edizione e diventato nel tempo un importante appuntamento per studiosi ed esperti non solo del mondo della ricerca, è stato caratterizzato da due momenti significativi:

- la mattina, una Sessione Plenaria durante la quale è stato conferito il Dottorato di ricerca Honoris Causa in “Energia e Sviluppo Sostenibile” a Shuji Nakamura, Premio Nobel per la fisica nel 2014 per l’invenzione del LED Blu nel 1991, che ha permesso la realizzazione delle lampade a LED bianche con la conseguente possibilità di applicare la tecnologia a LED all’illuminazione su vasta scala. L’invenzione di Nakamura costituisce uno spartiacque nel modo di produrre ed utilizzare la luce artificiale, per la straordinaria versatilità di costruire sorgenti di luce colorate con altissima efficienza energetica e con una elevatissima durata e sarà pertanto un onore ospitarlo nell’ambito del 19° Congresso CIRIAF;
- il pomeriggio, una Tavola Rotonda sul tema di grande attualità “Trasferimento tecnologico e nuove prospettive per i PhD - Manager della ricerca e della didattica”, con il contributo di esperti italiani e comunitari.

Si è tenuta anche una Sessione Poster sui temi che tradizionalmente hanno caratterizzato il Congresso CIRIAF, che ha rappresentato per i diversi gruppi di ricerca degli Atenei afferenti al CIRIAF - e non solo - un’importante occasione per comunicare le ricerche in atto e stabilire contatti per possibili collaborazioni

I Temi Congressuali, nell’ambito dei quali sono pervenuti 35 abstract e 23 full papers da parte di gruppi di ricerca afferenti a numerosi atenei, riguardano l’efficienza energetica, le fonti e i sistemi energetici rinnovabili ed alternativi, le nuove sorgenti luminose a LED e relative applicazioni, la qualità dell’ambiente costruito e l’inquinamento indoor, l’edilizia sostenibile e bioarchitettura, la conservazione delle opere d’arte, la green economy e la sostenibilità economico-sociale.

Come di consueto, nell'ambito del Congresso è stato inoltre assegnato il Premio "Mauro Felli", istituito per onorare la memoria del fondatore e primo Direttore del CIRIAF. Al fine di incoraggiare le giovani generazioni e sensibilizzarle sulle tematiche della sostenibilità, il Premio "Mauro Felli" 2019 è stato destinato a giovani studenti di Scuola Media superiore, che abbiano prodotto un elaborato (singolarmente o in gruppo) su una delle tematiche congressuali.

Il Presidente del Comitato Scientifico

Prof. Gino Moncada Lo Giudice

Il Presidente del Comitato Organizzatore

Prof. Franco Cotana

Il Vice Presidente del Comitato Organizzatore

Prof. Francesco Asdrubali

Il Direttore del CIRIAF

Prof. Pietro Buzzini

XIX Congresso Nazionale CIRIAF

Energia e Sviluppo Sostenibile

Luce e luci nell'arte e nel restauro

Marco Ciatti

Soprintendente dell'Opificio Pietre dure di Firenze

La relazione intende sottolineare alcuni importanti aspetti del rapporto tra la luce e l'opera d'arte. Prima di tutto la luce interna dell'opera, immaginata dall'artista come una dimensione astratta, oppure come una restituzione naturalistica della realtà, in connessione con gli sviluppi stilistici e le intenzioni espressive dei vari periodi storici. Per questo percorreremo alcuni esempi che, partendo dalle icone bizantine conducono ai primi effetti luministici naturali di Taddeo Gaddi, uno dei principali allievi di Giotto, nella cappella Baroncelli di Santa Croce, allo studio connesso con i nuovi criteri razionali e prospettici sostenuti da Leon Battista Alberti nel suo *De Pictura* ed attuati da Piero della Francesca nel *Sogno di Costantino* ad Arezzo e nella *Resurrezione* di Città di Castello, per passare poi alla luce protagonista della rivelazione della realtà umana con i suoi drammi in opere di Caravaggio e di Rembrandt. Si passerà poi ad esaminare gli esiti moderni di tale ricerca partendo da Corot, vero inventore della pittura dal vero, a Monet, ai Macchiaioli come Raffaello Sernesi e Giuseppe Abbate, sino alle teorie scientifiche del divisionismo di Seurat, in parte riprese da Previati. Tale rapporto tra conoscenze scientifiche ed attività artistica è presente anche nel mondo del restauro con la tecnica della 'astrazione cromatica' proposta da Umberto Baldini per il trattamento delle lacune non ricostruibili, basata sui principi della sintesi additiva e sottrattiva della luce. Vi è poi la questione dell'illuminazione reale delle opere nel loro luogo di collocazione e per la loro riproduzione fotografica, questioni complesse con rilevanti aspetti conservativi, con la presentazione della prima applicazione su grande scala dell'illuminazione a LED realizzata per la ricollocazione della monumentale *Croce dipinta* di Giotto della chiesa fiorentina di Ognissanti. La seconda parte della relazione sarà invece costituita da una rassegna dell'applicazione di varie altre lunghezze d'onda della banda elettromagnetica che diventano strumenti di conoscenza fondamentali per il restauro e per la conoscenza approfondita delle opere d'arte. Vedremo esempi di indagini in Rx, Infrarosso, Ultravioletto, luce strutturata per la resa 3D, tratti dall'attività dell'O.P.D. applicate al capolavoro di Leonardo, *l'Adorazione dei magi* e alla *Madonna del cardellino* di Raffaello.

XIX Congresso Nazionale CIRIAF

Energia e Sviluppo Sostenibile

Invention of High Efficient blue LED and Future Solid State Lighting

Shuji Nakamura

Solid State Lighting and Energy Electronics Center (SSLEEC), Materials and ECE Departments
University of California, Santa Barbara

Maruska and Tietjen did the first GaN growth by using hydride vapor phase epitaxy in 1969. Since their first GaN growth, a lot of breakthroughs have been achieved for the crystal growth of GaN and InGaN, conductivity control of p-type GaN, and the device structures of LED and laser diodes. Then finally, first high efficient blue LEDs were invented in 1993. The first white LED was also developed using the blue LED and YAG phosphor by Nichia Chemical Ind., in 1996.

Since first high efficient blue LEDs grown on sapphire were invented in 1993, these blue and white LEDs have been used for all kinds of applications, such as back light of LCD display, general lighting and others. I name these LEDs grown on sapphire and SiC substrate as 1st generation LEDs. These LEDs have been operated at a low current density due to an efficiency droop caused by a high dislocation density and Auger recombination. Recently, high efficient violet LEDs have been developed using GaN substrates by Soraa Inc.. It is called GaN on GaN LED. I like to name these high efficient violet LEDs grown on GaN substrates as 2nd generation LEDs because white LEDs made by using the violet LED grown on GaN substrates have superior characteristics in the view of the wavelength stability, efficiency droop, white color quality with a high CRI and the low peak intensity of the blue light which disrupt the circadian cycle.

First violet laser diodes (LDs) were invented in 1995. Then, those violet LDs have been used for the Blue-Ray DVDs. Now, these blue LDs are used for the application of laser projectors and automobile head lamps with the advantage of the directionality and high light output power density. These laser lighting could be used for a general lighting in the future by reducing the cost and improving the efficiency. I like to name the laser lighting as the 3rd generation solid state lighting.

Perugia, 12 aprile 2019, Università degli Studi di Perugia, Aula Magna

XIX Congresso Nazionale CIRIAF

Energia e Sviluppo Sostenibile

ARTICOLI SCIENTIFICI

XIX Congresso Nazionale CIRIAF

Energia e Sviluppo Sostenibile

New green paving systems for urban heat island and noise pollution mitigation

Ioannis Kousis ^{1,*}, Luca Ercolanoni ¹, Claudia Fabiani ¹, Anna Laura Pisello ^{1,2}

¹ CIRIAF – Interuniversity Research Centre on pollution and environment Mauro Felli – University of Perugia, Italy. Via G. Duranti 63 – 06125 Perugia

² Department of Engineering, Via G. Duranti 63 – 06125 Perugia - University of Perugia, Italy

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: anna.pisello@unipg.it

Abstract: Urban pavements cover more than 30% of total city surfaces widely affecting the heat balance of the city itself. In this view, such surfaces, exposed to heat gains and anthropogenic sources of, again, heat and noise, should be better designed and optimized in order to mitigate air pollution, heat gains from solar radiation, environmental noise. This work is indeed focused on the thermal and acoustic characterization of a green binder for non-bitumen based pavements. The binder itself is also modified by substituting mineral oil with bio based oil under the framework of circular economy. Thermal analysis showed interesting performance with minor sensitivity to green material inclusion. Acoustic performance may be further optimized by modifying also aggregates. The experimental analysis, in general, showed the necessity to approach environmental quality in urban systems by means within the same framework.

Keywords: Urban heat island; Urban noise Island; cool pavement; bio based material; solar reflectance; acoustic absorbance.

1. Introduction

Nowadays, the complex urban structure alongside the ceaseless urban sprawl prompt to Urban Heat Island's (UHI) steep aggravation [1]. Inherently, interconnected with Global Climate Change [2] UHI is referred to the urban overheating in disparity with the surrounding rural areas [3]. This effect is liable for increasing the mean annual temperature up to 3°C in many cities [4], while this temperature increase is even more intense during the summer period [5]. As a result, obnoxious citizens' living

standards are all the more engendered in the vast majority of urban regions around the world. That said, it is well documented that UHI is highly linked, among others, with an elevated cooling energy demand, thermal discomfort both indoors and outdoors and severe repercussions to citizen's health such as heat related mortality and morbidity incidences [6-7]. In parallel, to the huge concentration of anthropogenic activities in cities, dramatically exacerbates urban noise pollution, producing an additional detrimental phenomenon known as Urban Noise Island (UNI) [8]. As a matter of fact, in recent decades, inner-city noise is all the more regarded as a serious threat for citizen's health [9]. In this view, it is reported that up to 65% of European citizens are in peril due to UNI occurrences. With respect to the various noise sources, urban transportation noise takes the lead for the augmentation of UNI, since in most of the cases it is liable for up to the 80% of the total noise pollution in urban areas. The two main urban infrastructure components that the aforementioned materials are typically implemented are the pavements and the buildings. Several studies however, have oftentimes reported that pavements are the dominant buffer of urban microclimate, since in most cases they may cover more than 40% of total cities' area. That said, it is well documented that since the industrial revolution the vast majority of pavements are traditionally made of materials, such as asphalt and bitumen. For instance, it is estimated that more than 90% of the 5.2 million kilometers of European paved roads and highways are surfaced with asphalt. Therefore, by virtue of their dark-colored nature, these conventional materials extendedly absorb the incident solar radiation, resulting to excessive pavements' superficial temperature, especially during the summer periods. At the same time, industrial developments of modern world, intensified both use of energy resources and consumption of energy with severe environmental repercussions. Aiming to tackle the ongoing climatic degradation EU has already enacted key policies for all member states. A main prerequisite among others, are the environmentally friendly, sustainable infrastructures. Newly, EviZero denoted as an eco-friendly counterpart of conventional asphalt, has drew the regard of several researchers. EVIzero's main characteristic is its transparent nature, which results to a coloured pavement. In order to mitigate both UHI and UNI, the idea of this study is, within the framework of an Italian project SOS CITTà to better investigate EviZero's thermophysical and acoustic behavior and then, in addition, four altered variants of EviZero are examined in order to gauge their UHI alleviation prospect and/or their capability of mitigating urban noise stress.

2. Materials and method

In this study, the standard EVIzero, available on market, and 4 novel modified versions of it were tested as an eco-friendly counterpart of conventional asphalt. In this study, the standard EVIzero, available on market, and 4 novel modified versions of it were tested as an eco-friendly counterpart of conventional asphalt. EVIzero is an abbreviation that stands for "Environmental Visual Impact zero" and is the trade name of a low visual impact synthetic binder made up of a polyolefin mixture, that aims to represent a valid alternative into classical mixtures employed in road and another infrastructures design. It is sold to be used as a binder in the manufacture of surface course, i.e. the most superficial layer of a road. EVIzero is made up of different components: more than a half of it is composed by a by-product of EVA (Ethylene-Vinyl Acetate), which is the copolymer of ethylene (60-

90%) and vinyl acetate (10-40%) and the other main component is paraffin (wax). The remaining part is made of mineral oil (paraffin oil) and additives, especially styrene and EPR (Ethylene Propylene Rubber) which improve the mechanical properties of the binder.

2.1. EVIzero alterations

Apart from the standard EVIzero 4 modified versions produced by inserting bio-oils – palm oil and animal fat - instead of mineral oil, were examined as well. The palm oil comes from stock leftovers nearing expiration, provided by the Piselli pastry shop while the animal fat comes from scraps supplied by an Italian (Perugia) slaughterhouse and is composed of chicken and pork fat. Four modified versions of EVIzero including bio oils were examined:

1. Evizero EVIzero including 100% Palm palm oil;
2. EVIzero including 100% Animal animal Fat;
3. EviVzero including 50% Palm palm oil and 50% standard mineral oil;
4. EviVzero including 50% Animal animal fat and 50% standard mineral oil.

Except for the oil modifications all the other components of EVIzero remained the same.

2.2 Selected aggregates

The aggregates used for construction of all the samples are from the quarry "Gola della Rossa Mineraria", located in Serra San Quirico (AN). In particular, they are composed of calcium carbonate ($\text{CaCO}_3 > 98\%$), and two different sizes of them were used; 0/6 sand and 4/8 grit. The investigated types of EVIzero were multiphysically examined through their corresponding samples. For each type of EVIzero, 3 samples were constructed for multiple examination of each type. The height of its sample is 6 cm, while the diameter is 9.6 cm. In total 15 samples were created.

2.3 Procedure - Instrumentation

Firstly, aiming to determine aggregates' distribution their grading curve (Fig) was calculated by means of EN standardized sieves; one perforated metal sieve for the large grains and one of thin fabric/metal for the finest grains (Fig). The sieves with dimensions < 4 mm comply with the ISO 3310-1 standard and therefore are in woven cloth, while the sieves with dimensions ≥ 4 mm refer to the ISO 3310-2 standard and therefore are in perforated metal. Thereafter, both the binders and aggregates were heated inside an oven at 175°C for three hours. The oven used to produce the samples is very similar to the domestic ovens. It is a thermally insulated chamber used to heat or dry substances. Its internal and external walls made from zinc coated steel and insulated with mineral wool, while the front doors are made from stainless steel. The temperature can be controlled through the display with digital thermoregulator and indicator. The heating is by convection and the air is heated by joule effect by an electric coil placed in the lower part of the oven. Subsequently, binders and aggregates were mixed together on a hotplate. The hot plate is a simple electric tool used to heat everything placed on it by conduction. It consists of a metal plate heated by joule effect and controlled by a thermostat.

When the EVIzero and the -aggregates are appropriately mixed, the mixture was inserted into a cylindrical mould made from steel in order to be protected against corrosion. The utilized molds are composed from three parts: a base and two cylinders. Their main characteristics can be seen in the table below:

3. Experimental characterization

To calculate the solar spectral reflectance in the wavelength, range 300-2500nm, the standard procedure reported in the ASTM E903-12 Standard Test Method and ASTM G173-03, validated by the European Cool Roof Council, was followed. This procedure involves performing the integral average of the spectral reflectance in the band of interest, weighed on the solar spectral irradiance [$\text{W}/(\text{m}^2\text{nm})$] to the terrestrial surface, as tabulated in the ASTM Standard. To that end, the apparatus utilized for determining the optical properties of the studied samples, was a SolidSpec-3700 by Shimadzu, that is the top-of-the-line UV-VIS-NIR spectrophotometer. This tool allows to carry out photometric measurements in order to measure the reflection that occurs as a result of the interaction between the material's surface and incident radiant energy. This is accomplished through its 60mm-diameter integrating sphere with a wavelength accuracy of 0.1

3.1. Thermal analysis

The thermal characterization of the samples was carried out by means of two different experimental facilities: a Hot Disk TPS 2500S apparatus and an ATT DM 340 SR climatic chamber. For capturing an accurate picture in terms of thermal characterization, the thermal conductivity (nominal error of 3%), thermal diffusivity (nominal error of 5%) and the volumetric specific heat (nominal error of 7%), were reckoned through the Hot Disk TPS 2500S apparatus, developed by Gustaffson [1], and according to the ISO 22.007-2 standard. Thereby, the Transient Plane Source (TPS) method was implemented for measuring the aforementioned thermal properties; a planar $10\mu\text{m}$ Nickel double spiral, functioning as both a heat source and a dynamic temperature sensor, is placed between two identical samples of the same type of EVIzero and electrically heated via Joule's effect. In other words, it provides the samples with a specific heating power P_0 for a time step t . Within this time step, the thermal properties of the bulk material are identified through the resistance of the probe $R(t)$.

3.2. Thermal monitoring

For the thermo-optical analysis of the EVIzero versions, all samples were placed in the controlled environment of an ATT DM340SR climatic chamber and exposed to a conditional cycle. This simulation produced by considering values of temperature, relative humidity and incoming solar radiation obtained from real monitored data of the hottest day of summer (30/07/2018), in the area of Perugia in Italy.

The climatic chamber consists of an open air space with dimensions $601 \times 810 \times 694$ mm and a solar simulator. The thermal insulation in its interior space is guaranteed by glass wool, treated with a special

binder based on thermosetting resins. Further on, the solar radiation is artificially produced by an adjusted halogen lamp placed in the upper part of the chamber.

Together with the utilization of 12 PT100 built thermocouples, the air temperature (in the range $-40 \div 180\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$), the relative humidity (between $10 \div 98\% \pm 3\%$) and the radiative power according to the solar spectrum (in the power range $600 \div 1200\text{ W}$ of the halogen lamp) were measured. In this study, T-type thermocouples were utilized, in which the two metal filaments are made of copper and constantan (an alloy that usually consists of 55% copper and 45% nickel). Thermocouple limitation however, is accuracy; it is difficult to obtain systematic errors of less than $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. In this context, in order to ensure the most accurate measurements, the thermocouples were positioned on the upper surface (3 thermocouples per each sample), directly irradiated by the lamp, and on the lower surface, in contact with the insulating surface of the sample holder (3 thermocouples per each sample). Contact between the sample and the thermocouples was ensured with the use of masking tape and thermal grease. Finally, both positive and negative pole of each thermocouple was connected to a channel thermocouple device (National Instruments Spring Terminal 16 channels), a hardware used to collect all the thermocouples. This device is connected to a National Instrument compact DAQ that acquire analog signals and the obtained data were elaborated by Lab View software.

3.3. Acoustic analysis

The samples were acoustically characterized through their sound absorption and sound insulation properties. To do that, an impedance tube (Kundt's tube) was implemented for the calculation of the normal incidence absorption coefficient (α) and the Transmission Loss (TL) of each sample.

The absorption coefficient is defined as the fraction of the incident sound wave energy that is rejected by the examined sample. Following the ISO 10,534-2 standard [2], the Transfer Function Method (TFM) was employed to that end. In the TFM, a noise source located inside the tube, generates plane waves, while by measuring the acoustic pressure at two designated spots through wall-mounted microphones and by calculating the complex acoustic transfer function and successively the normal incidence absorption of the acoustic material, the decomposition of the interference field was succeeded.

On the other hand, in order to quantify the magnitude of the samples' insulation properties, Transmission loss was measured through the 'two-load' transfer function method [3,4]. TL is measured through sound transmission coefficient (τ_s) given by:

Similar to the aforementioned TFM, the sound pressure is acquired in four designated microphone spots. Moreover, for the measurement of both sound absorbance and transmission loss the sound field in the up and downstream segments of the standing wave tube is considered to be fairly approximated by superposition of positive and negative-directed plane waves. However, unlike the measuring of sound absorbance, for obtaining TL, two configuration of the tube termination are used; anechoic and rigid.

4. Discussion of results

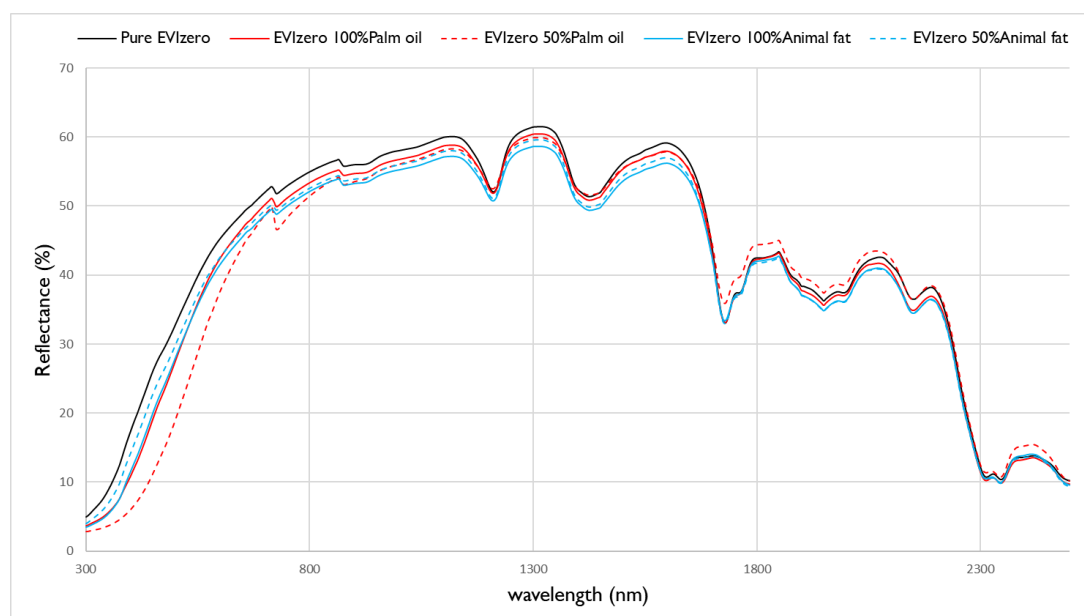
In this section the results of the multiphysics carried out for the standard EVIzero, the EVIzero made with 100% palm oil/animal fat and EVIzero with 50% mineral oil and 50% palm oil/animal fat, are presented. More specifically, the optical, thermo-optical and acoustical behavior of all EVIzero variant were investigated. Following that, an LCA analysis was carried out for identifying the environmental impact of the three types of EVIzero that excelled in the multiphysics analysis; the standard EVIzero, EVIzero made with 100% palm oil/animal fat. Since the main subject of this study is a further optimization of the EVIzero binder, the standard EVIzero, which is available on market, constitutes the reference EVIzero type in all the experiments to be presented.

It should be mentioned, that for the optical and acoustical characterization of each EVIzero type 9 tests were accomplished; 3 tests per each sample (3 samples for each EVIzero type have been created). Under the same scenario, 3 tests including simultaneously all EVIzero types were conducted for the thermal-optical characterization. As such, the results can be considered as statistically significant. In the end, average values for each EVIzero type were calculated and presented with regards to each characterization.

4.3. Results from the optical analysis

As illustrated in Figure 1 the solar reflectance of all the examined samples follow roughly the same trend in the range of visible to near infrared wavelengths. This almost identical samples' behavior was expected, since they are made with the same stone aggregates which cover the 95% of their total mass, while the binder covers only the 5%. Thus samples' optical behavior is dominated mainly by the aggregates. It should be noted however, that the standard EVIzero slightly outperforms its alterations in the range of 300 – 1600 nm, while in the range of 1600 – 2500 the EVIzero's sample including 50% Animal fat and 50% mineral oil performs the best solar reflectance.

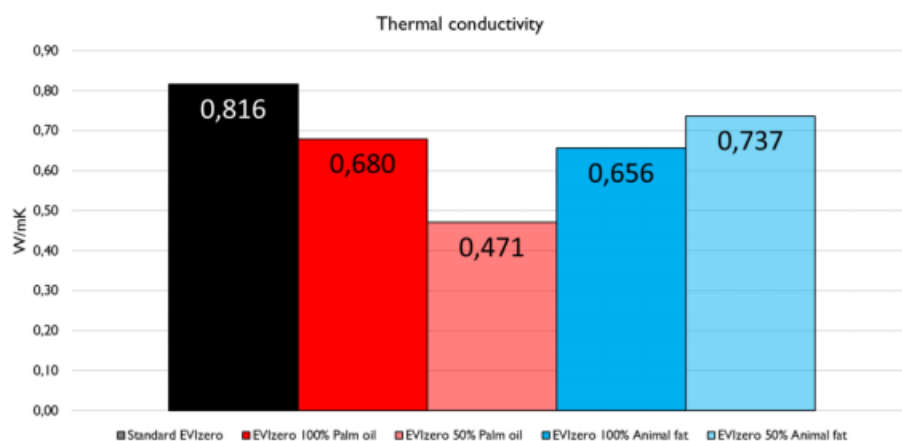
Figure 1. Solar reflectance of sample measured by means of spectrophotometer.



4.3. Results from the thermal analysis

As it is depicted in Figure 2, there is a noteworthy variation in terms of thermal conductivity among the pavements samples. The lowest value is measured for the sample made with 50% mineral oil and 50% palm oil (0.471 W/mK) and the highest for the standard EVIzero (0.816 W/mK). In parallel, almost the same behavior was observed for the samples made with 100% animal fat and palm oil, with values of 0.656 W/mK and 0.680 W/mK correspondingly. A similar trend was perceived also for thermal diffusivity. The lowest value is observed for the sample made with 50% mineral oil and 50% palm oil (0.348 mm²/s) and the highest for the standard EVIzero (0.625 mm²/s). However, the sample made with 100% animal fat has the second lowest thermal conductivity with 0.498 mm²/s, the one made with 100% palm oil has the second highest (0.611 mm²/s), almost equal to the standard EVIzero. On the contrary, with regards to the volumetric specific heat, no substantial variations among the examined samples was detected. In fact, the observed values vary from 1.113 M/m³K (EVIzero made with 100% palm oil) to 1.411 M/m³K (EVIzero made with 100% animal fat).

Figure 2. Thermal conductivity values measured by means of hot disk.



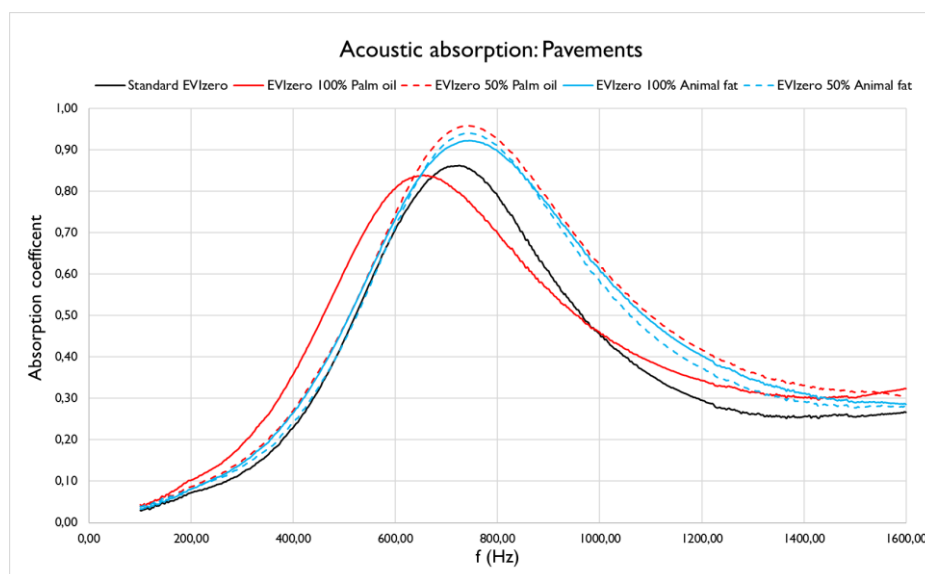
The thermal monitoring procedure shown that the superficial temperature of all samples is almost the same within 00:00 – 12:00 and 18:00 – 00:00. Nonetheless, during the peak hours of the day, in terms of air temperature, a diversification among the samples can be noticed. The highest superficial temperature was recorded for the sample including 50% Animal fat followed by the one made with 50% Palm oil. On the other hand, interestingly, the lowest superficial temperature was recorded for the sample including 100% of Animal fat ($T_{max} = 56.6$ °C), while the standard EVIzero reached the second lowest temperature ($T_{max} = 58.4$ °C).

3.3. Results from the acoustic analysis

In the Figure 3 the acoustic performance of EVIzero samples is depicted. In terms of incident soundwave's absorption, the sample made with 100% Palm oil out performs in the low frequencies, while the same do the sample including 50% Palm oil in the middle frequencies. It should be emphasized that the standard EVIzero is characterized as the least able to absorb sound. Yet, on the

whole, the aforementioned variations are not considered of high significance owing to their limited magnitude.

Figure 3. Acoustic absorption of pavement samples.



5. Concluding remarks

In this study a multiphysics analysis was carried out for 5 alternative versions of the EVIzero, an eco-friendly binder for pavements. More precisely the standard EVIzero available on market alongside with four modified versions made with waste bio oils (Animal fat/Palm oil), were characterized optically, thermally and acoustically. In particular, the aforementioned comparison analysis shown promising results both for further optimization of EVIzero's physical properties and for downsizing the environmental impacts during its production.

The optical analysis showed that the influence of the different EVIzero binders is not significant. This is all to be expected since a fraction of 95% all samples is made up of the same stone aggregates. Therefore, their solar reflection is inevitably affected predominantly by this particular samples' component. That said, since the EVIzero is a transparent binder, a proper choice of light colored aggregates is a prerequisite for ensuring good solar reflectance properties of the pavement.

Experiments carried out in the climatic chamber revealed highly gripping results for further optimization of EVIzero in terms UHI mitigation. Whilst the standard EVIzero pavement sample is characterized by identical solar reflectance with the one made with 100% of Animal fat, the latter obtained lower superficial temperature during the peak hours of the day, in term of ambient temperature. Interestingly though, the samples made with 50% of mineral oil and 50% of animal fat/palm oil significantly raised their superficial temperature within the abovementioned peak hours. This could be explained by possible chemical interaction taking place between the two types of oil.

In terms of acoustic behavior, all samples found to have an excellent sound absorption values (sound absorption coefficient over 0.8) within the range of 600 – 800 Hz. In general, no significant variation

among the samples were found. However, the samples representing EVIzero made with 50% of Palm oil, 50% and 100% of Animal fat slightly outperform the standard EVIzero in terms of noise mitigation.

Overall, the results presented in this study, countenance that the standard EVIzero binder available on market could be further optimized in terms of both its physical properties and its environmental repercussions. Therefore, a superior UHI mitigation of EVIzero may be achieved alongside with a more eco-friendly production procedure, and therefore contributing all the more to the EU directions.

To that end, as a future development of this study, in field experiments with EVIzero made with animal fat will be carried out for evaluating and furthering the abovementioned encouraging results also in terms of LCA.

5. Acknowledgements

The authors thank Fondazione Cassa di Risparmio di Perugia for supporting the project SOS CITTA' – Grant Agreement 2018.0499.026 – Sostenibilità ambientale di superfici innovative per il benessere dei cittadini e la resilienza delle città.

References

1. Oke, T. R. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **1982**, 108(455), 1-24.
2. Zinzi, M.; Santamouris, M. Introducing Urban Overheating—Progress on Mitigation Science and Engineering Applications. *Climate* **2019**, 7(1), 15
3. Oke, T. R.; Johnson, G. T.; Steyn, D. G.; Watson, I. D. Simulation of surface urban heat islands under 'ideal' conditions at night Part 2: Diagnosis of causation. *Boundary-Layer Meteorology* **1991**, 56(4), 339-358.
4. Akbari, H. Characterizing the fabric of the urban environment: a case study of Sacramento, California. (1999) <https://escholarship.org/uc/item/7b87n84g>
5. Levermore, G.; Parkinson, J.; Lee, K.; Laycock, P.; Lindley, S. The increasing trend of the urban heat island intensity. *Urban climate* **2018**, 24, 360-368.
6. Ahmed, S. Assessment of urban heat islands and impact of climate change on socioeconomic over Suez Governorate using remote sensing and GIS techniques. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* **2018**, 21(1), 15-25.
7. Cartalis, C.; Synodinou, A.; Proedrou, M.; Tsangrassoulis, A.; Santamouris, M. Modifications in energy demand in urban areas as a result of climate changes: an assessment for the southeast Mediterranean region. *Energy Conversion and Management* **2012**, 42(14), 1647-1656.
8. Pijanowski, B. C.; Villanueva-Rivera, L. J.; Dumyahn, S. L.; Farina, A.; Krause, B. L.; Napoletano, B. M.; Pieretti, N. Soundscape ecology: the science of sound in the landscape. *BioScience* **2011**, 61(3), 203-216.
9. D'Alessandro, F.; Schiavoni, S. A review and comparative analysis of European priority indices for noise action plans. *Science of the Total Environment* **2015**, 518, 290-301.

XIX Congresso Nazionale CIRIAF

Energia e Sviluppo Sostenibile

Indoor microclimatic study for book heritage preservation in historic buildings by experimental and numerical analysis: the case study of the Mario Marte library, Perugia, Italy.

Elisa Moretti ^{1,*}, Ettore Stamponi ²

¹ Department of Engineering– University of Perugia, Via G. Duranti 93 (Perugia, Italy)

² CIRIAF– University of Perugia, Via G. Duranti 63 (Perugia, Italy)

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: elisa.moretti@unipg.it

Abstract: In order to ensure the correct conservation of the book heritage, the hygrothermal conditions of the buildings where the books are stored must respect precise ranges of temperature and relative humidity. The library “Mario Marte” (Perugia, Italy) has a basement books depository that has shown problems related to the formation of mold on books, especially in one of its rooms. This is probably caused by a combination of several factors: a low ventilation of the room, the storage of the volumes, which are placed in compact shelving and high values of relative humidity. The paper presents the results of more than 15 months of microclimate monitoring in the rooms of the book depository, in the surrounding basement and in the floors above the book depository. One of the most critical periods is the summer season when the relative humidity values are higher (up to 20%) than the suggested values for most of the time. Also in winter, even if the hygrothermal parameters remain within the ranges recommended by the regulations, there are sudden variations in temperature, caused by the heating system, which could cause mechanical stress to the books. Monitoring was useful not only to understand what the critical issues were but also to create and calibrate a thermal model of the building by using EnergyPlus 8.7. Finally, with the help of the model, interventions were proposed to obtain the best conditions for the conservation of books, trying not to use systems too expensive in terms of energy and costs.

Keywords: Indoor microclimatic analysis; Book heritage; Conservative preservation; Building simulations.

1. Introduction

Microclimatic conditions play a relevant role in conservation and maintenance of book heritage, especially in historical buildings [1–6]. In order to ensure the correct conservation of cultural heritage in libraries, historical exhibitions and museums, the hygrothermal conditions must respect precise ranges of temperature and relative humidity, according to literature and technical standards [7-12]. Several studies investigated the effects between cyclic variations of indoor conditions, outdoor climate and environmental pollution and the related deterioration and biodegradation processes in materials [13-16].

Starting from the recent research works [17-21], the indoor microclimatic variations linked to building thermo-physics and the outdoor conditions were investigated in order to investigate unfavorable conditions for material conservation and facilitate microorganism growth. The study was carried out in the Library “Mario Marte” in Perugia (Italy). The library has no cooling and mechanical ventilation systems, whereas the building is equipped with a heating system with radiators. On the basement there is a books depository which has shown problems related to the formation of mold on books, especially in one of its rooms where the books are placed in compact shelving.

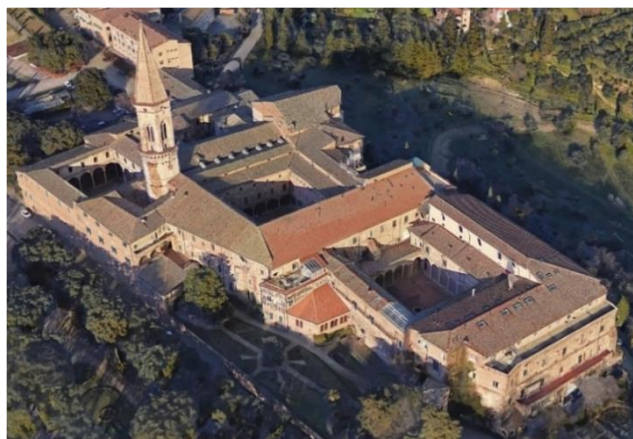
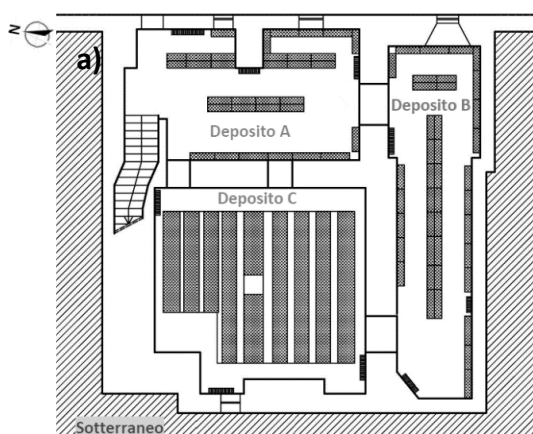
The paper presents the results of more than 15 months of microclimate monitoring in the rooms of the book depository, in the surrounding basement and in the floors above the book depository. The experimental campaign aimed to investigate the relationship between indoor and outdoor conditions and to verify the conditions of preservation of the books. Data were also used to calibrate a thermal model of the building by using EnergyPlus 8.7. Finally, interventions were proposed in order to improve the conditions for the conservation of books and they were tested thanks to the validated numerical model.

2. The case study

The case study is the book deposit of the “Mario Marte” library (Perugia, Italy) situated inside the monumental complex of the Benedictine Abbey of San Pietro. Abbot Pietro founded the Benedictine abbey in 962, the monumental complex has undergone numerous changes and enlargement until it becomes as we see it today (Figure 1).

Between the second and the third cloister is located the library “Mario Marte” of The Department of agricultural, food and environmental sciences of University of Perugia. From the library reading room, you can access the book deposit located in the basement. The deposit is divided into three main rooms called deposito A, deposito B, and deposito C.

The deposit has exposure to the north-east (deposito A and deposito B) and borders a non-heated basement on the other three sides (Figure 2). The total surface of the deposit is about 170 m², the ceilings are 4,5 m high in deposito A and deposito B, while the deposito C is lower than the others about 40 cm. The total volume of the deposit is about 850 m³. The three deposits are connected by openings without door or windows and each deposit is equipped with 3 cast iron radiators (thermal input of 12.7 kW). The walls (both internal and external) are very thick: the thickness ranges from 0.6 m to over 1 m [22-23].

Figure 1. Monumental complex of the Benedictine Abbey of San Pietro**Figure 2.** Layout of the book deposit (a) and deposito A (b)

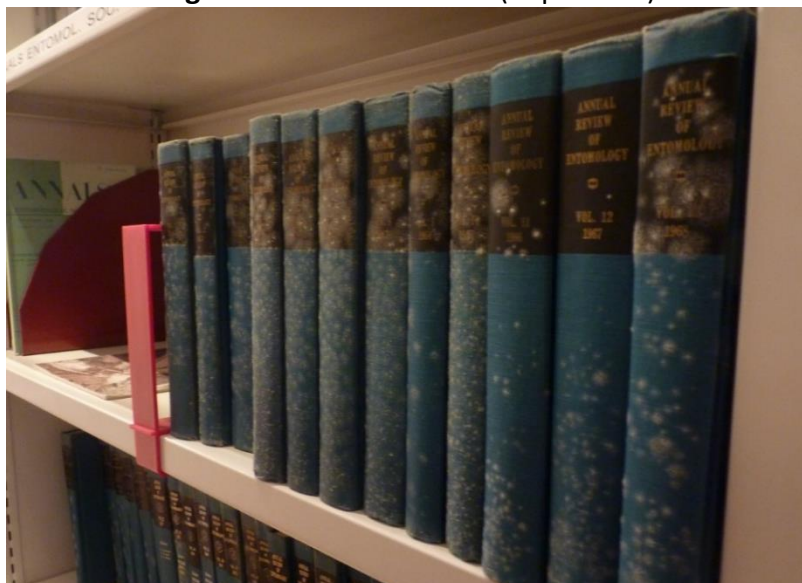
Inside the deposits are preserved about 34'000 volumes of economic and agrarian newspapers published between 1800 and the end of the Second World War. The volumes inside deposito A and deposito B are placed on open metal shelving while in deposito C they are stored in compactable shelving on rail (Figure 3).

Figure 3. Render of the deposits

3. Aim and methodology

The volumes housed in the historic building are mainly made of organic material and are naturally inclined to degradation. The aim of research is to investigate how indoor and outdoor microclimatic conditions can encourage the microorganisms' growth and in consequence determine unfavorable conditions for paper material conservation. At present the main problem is presence of molds, especially in the deposito C on the volumes which have leather or fabric cover (Figure 4).

Figure 4. Molds on books (deposito C)



The molds appeared first in deposit C and then in the other deposit rooms since 2014. A preliminary study by the *Laboratorio di biologia del restauro* (2015) showed that the worst condition for conservation are inside the compactus shelves (Figure 5). Inside the deposito C, inside the compactus, airborne fungal spores rich in summer 260 spores/m³ [24]. This is probably caused by poor ventilation as well as high values of relative humidity.

Figure 5. Compactus shelves (deposito C)



High-density storage systems referred to as “movable shelving” or “Compactus type shelving” are employed by many libraries, archives and conservation institutions suffering from limited space. These systems minimize the amount of space required for storage by compacting blocks of shelves (or cabinets of drawers) tightly together. These blocks slide along tracks and can be moved apart (opened) for the retrieval of items positioned on a particular block and then moved back together (closed). These characteristics are advantageous for the preservation and storage of materials but can also be problematical when used in conservation environments lacking efficient climate control systems. In the last decade, several investigations in libraries and archives especially within Compactus shelving blocks have reported mold contamination and growth on volume bindings made of leather, parchment or cotton fibres. Surprisingly these reports consistently observed white and irregular spots of fungal spread mainly on the exposed part of the volumes stored mainly in the lower shelves of the blocks [25].

In order to investigate the causes that have lead the development of molds inside the compactus and to propose some interventions the work consist of five principals steps:

- literature review;
- monitoring campaign concerning indoor conditions (temperature; relative humidity; illuminance; carbon dioxide).
- analysis of the results;
- numerical analysis;
- intervention proposal.

From the analysis of International Federation of Library Associations (IFLA) [7], ASHRAE guidelines [8], UNI 10829 [9], and UNI-EN 15757:2010 [10] the main parameters to be monitored and the limit values for a correct conservation are shown in table 1.

Table 1. Microclimate conditions for a correct conservation

	Minimum	Maximum	Maximum daily change
Relative Humidity (RH)	40%	60%	6%
Temperature (T)	14°C	22°C	1.5°C
Lighting	-	150 lux or $300 \frac{\text{lux} \times \text{hours}}{\text{day}}$	-
Carbon Dioxide (CO₂)	-	5000 ppm	-

Ventilation is another important factors to ensure a correct conservation. Ventilation system is mainly used to exchange air with outdoor and secondly it can be used to implement a passive control system of temperature and relative humidity. Chapter 4 of the European standard EN 15759-2 [26] provide guidance in this respect, whereas guidelines to programming the ventilation system are included in Chapter 8.

4. Results and discussion

4.1. Experimental Campaign

The first step of the research consists of the monitoring of the parameters connected to the presence of people within the deposit: pollutants and lighting.

To measure carbon dioxide infrared sensor BSO103, connected to a datalogger, was used. The values of CO₂ (Table 2) are not only lower than the limit values ensure the correct conservation of the book heritage, but also within the comfort levels for people (<600ppm).

Table 2. CO₂ measured values

Deposit	CO ₂ (ppm)
Deposito A	585
Deposito B	577
Deposito C	554

The illuminance was measured by a Luxmeter Minolta Chroma Meter CL-200. Some values of illuminance (Table 3) exceed the limit values of the UNI 10829 (150 lux), but the value of the cumulative illuminance is most significant for a correct conservation [7]. The values of the cumulative illuminance comply with the limit values because the lights are switched on only when the library staff gets into the deposit. Since the access is allowed only to library staff, that goes to the deposit only few times a week, the pollutants and lighting are not considered a threat for conservation of books.

Table 3. Illuminance values

Deposit	Shelve	Height (cm)	Illuminance (lux)
A	18	150	40
A	21	270	270
B	09	150	130
B	09	270	270
C	O	270	250
C	S	150	5

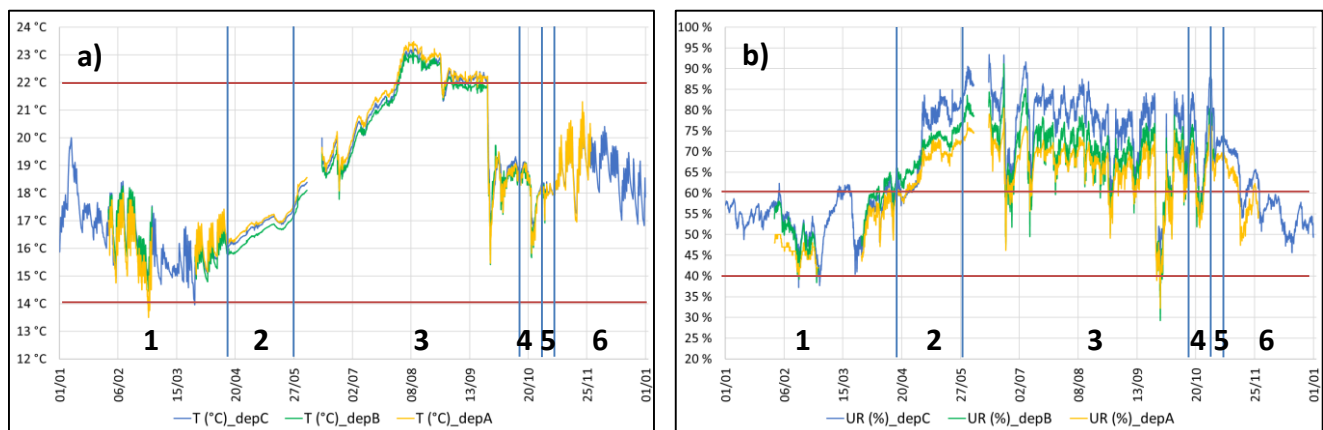
The second step of the research consists in the continuous monitoring (every ten minutes) of the deposit indoor microclimatic variables: temperature T (°C), and relative humidity RH (%). The monitoring campaign started on November 2017 and it is still in progress. Furthermore, air temperature and relative humidity were measured in the basement, in the upper floors and outdoors. All data were used for the calibration of the thermodynamic model and to understand what is the correlation between the parameters of the deposit and the others of the boundary zones.

The 2018 was divided in 6 different campaign that identified 6 different conditions (Table 4).

Table 4. Monitoring campaign

#	From	To	Exterior windows	Windows between C and basement	Heating system
1	01/01/18	15/04/18	Closed	Opened	On
2	16/04/18	27/05/18	Closed	Opened	Off
3	28/05/18	15/10/18	Opened	Opened	Off
4	16/10/18	29/10/18	Opened	Opened	On
5	30/10/18	07/11/18	Closed	Opened	On
6	31/12/18	27/01/19	Closed	Closed	On

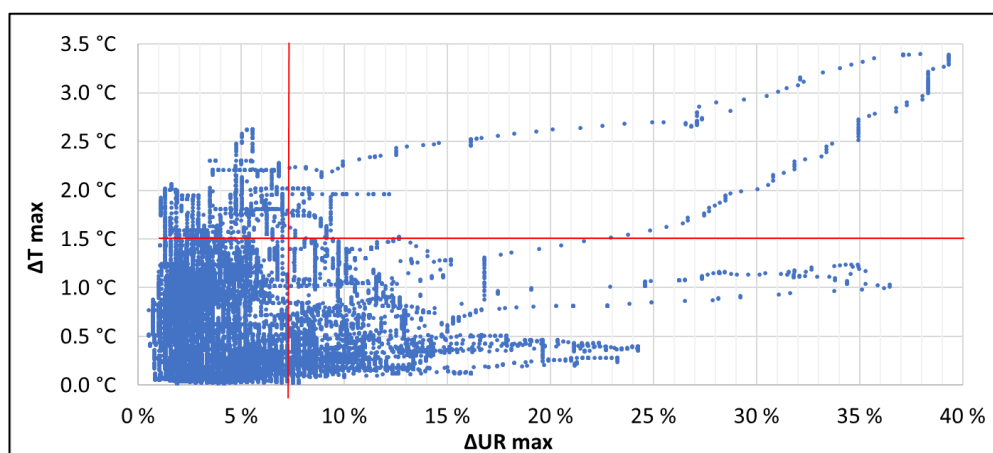
The analysis of the results shows that the termohygrometric parameter trends are strongly affected from the outdoor climate conditions and they follow the meteorological variables with some delay and damped. However, in winter the air temperature remains within the ranges recommended by the regulations, but there are quick variations, caused by the heating system, which could cause mechanical stress to the volumes (Figure 6).

Figure 6. Trend of temp. (a) and relative humidity (b) in red references limit (2018, hourly data)

However, the most critical season is summer (campaign 3), especially in the deposito C, as shown in table 5 and figure 7: temperature and relative humidity are out of the range and, in particular, the relative humidity is higher than the limit value for 89% of time.

Table 5. Deposito C min, max, average and daily $\Delta_{\max}$ values for the 6 campaign – hourly data

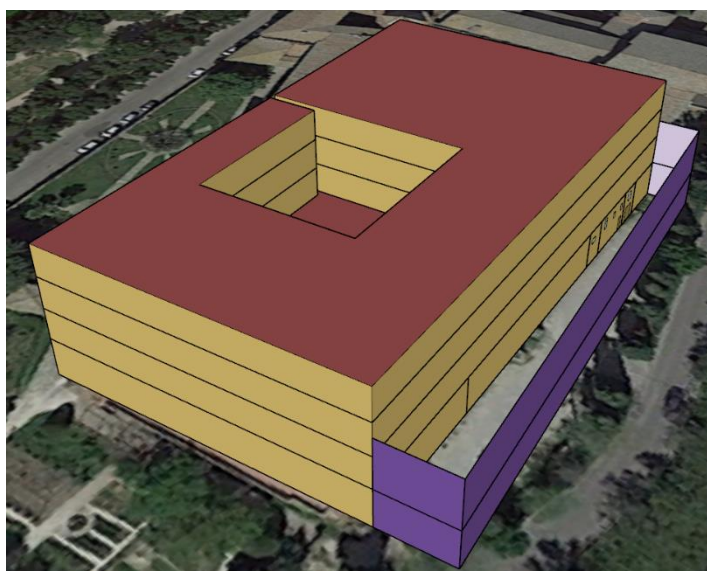
Campaign	Min. T	Max. T	T _{average}	Daily $\Delta_{\max}$ T	Min. RH	Max. RH	RH _{average}	Daily $\Delta_{\max}$ RH
1	14.0°C	20.0°C	16.4°C	2.6°C	36.5 %	64.3 %	54.4 %	14.3 %
2	16.1°C	17.6°C	16.8°C	0.5°C	56.1 %	85.6 %	72.3 %	16.2 %
3	16.7°C	23.5°C	20.8°C	3.4°C	40.7 %	95.6 %	76.4 %	39.3 %
4	16.7°C	19.1°C	18.1°C	1.5°C	53.2 %	88.1 %	72.7 %	15.2 %
5	17.7°C	18.7°C	18.1°C	1.2°C	66.5 %	82.3 %	73.1 %	14.1 %
6	15.4°C	20.8°C	18.4°C	2.9°C	34.9 %	73.0 %	51.4 %	12.6 %

Figure 7. Deposito C, couples of points ΔUR_{max} - ΔT_{max} 

4.2. Simulations

4.2.1. Model validation

The books deposit was modeled within EnergyPlus and SketchUp (Figure 8) and a weather file was created using data from a weather station located about 3 km from the investigated building [27]. In order to have the most representative simulation, the whole building was modeled, including the surrounding basement, the cloister, the floors above the deposit and the external trees.

Figure 8. Building model made in SketchUp

According to ASHRAE guidelines [28], Defining m_i the measured data, s_i the simulated data, n the number of observations and $\bar{m}$ the the mean value of measured data, the following indices were used for calibration:

- Normalized Mean Bias Error (NMBE) - [%]:

$$NMBE = \frac{1}{\bar{m}} \frac{\sum_{i=1}^n (s_i - m_i)}{n} \times 100 \quad (1)$$

- Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error (CV(RMSE)) – [%]:

$$CV(RMSE) = \frac{1}{\bar{m}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (s_i - m_i)^2}{n-p}} \times 100 \quad (2)$$

- Coefficient of determination (r^2): this coefficient is simply the square of Pearson's index (r), that is a correlation index between two statistical variables and it ranges from -1 up to 1. If $r=1$ the two variables are directly correlated; if $r=-1$ they are inversely correlated, while if $r=0$ there is no correlation between the two variables.

Having outputs every ten minutes, the model can be considered validated only under these conditions:

- NMBE: -10% ÷ +10%;
- CV(RMSE): <30%;
- R^2 : > 0,75.

The model was calibrated with particular attention to the trend of relative humidity. During the calibration, two main variables were analyzed in order to improve simulation outputs: the thermophysical properties of the envelope materials of the whole building, the air infiltration between the deposits A and B and outdoor, and the air exchange rate between deposito C and the basement. Figure 9 and table 6 show the results of calibration for the campaign 3.

As shown in table 6, all the values of campaign 3 are included in the limits of AHRAE Guidelines both for air temperature and relative humidity.

Figure 9. Simulation of temperature and relative humidity in deposito C for summer season

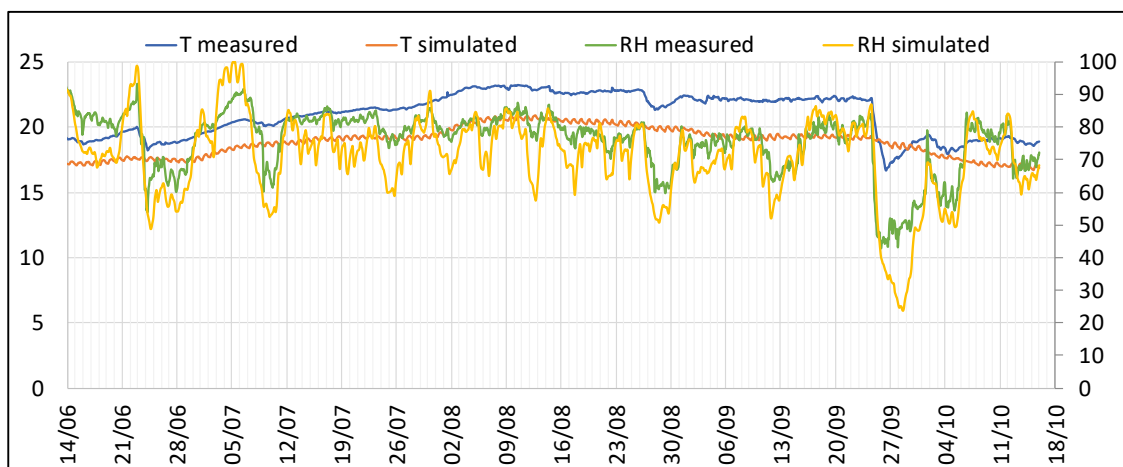


Table 6. Calibration indices for campaign 3

Indices	Temperature			Relative Humidity		
	Dep. A	Dep. B	Dep. C	Dep. A	Dep. B	Dep. C
NMBE [%]	-5.2	-5.9	-6.9	1.8	-0.1	-5.5
CV (RMSE) [%]	6.5	6.9	10.3	10.8	9.0	10.0
R ²	0.795	0.840	0.826	0.751	0.825	0.797

4.2.2. Model application and preliminary intervention proposal

The validated model allowed to evaluate the effectiveness of some measures carried out during the monitoring (the closing of the opening on the wall between deposito C and the basement) and to study some interventions. Firstly, the use of a dehumidification system, also considering different climate conditions, was investigated. Finally, the model was used to understand if the opening of exterior windows leads better thermohygrometric conditions in the deposit and to study a new controlled opening of windows (a simple opening during all the summer season is carried out by the library staff at present).

Due to the monitoring results, on 2018, November 8th the opening between deposito C and the basement (characterized by high humidity) was closed. This simple measure seems to have reduced the variations of relative humidity during the following winter months. The model shows that also during the spring-summer period the closing could have some positive effects on relative humidity (Figure 10). These results have been confirmed also from the 2019 partial spring season monitoring.

Figure 10. Deposito C: comparison trend of RH during the month of May, hourly frequency.

Red: 2018 trend with an opening between the deposit and the basement - Blue: new trend after the closing of the opening.



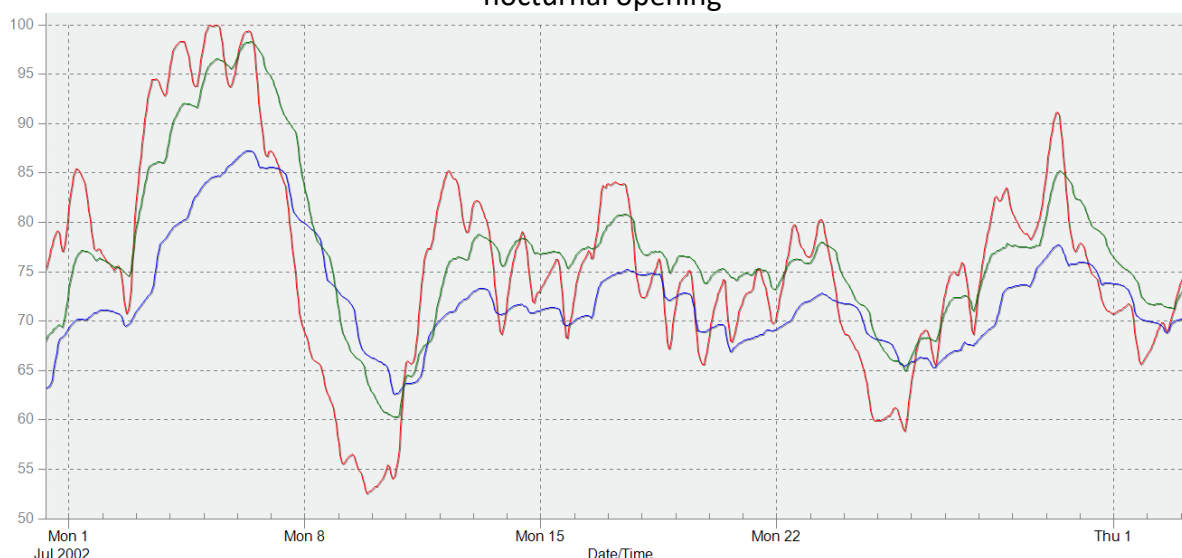
The model was also employed to analyse the impact of a dehumidification system composed of two dehumidifiers, one in the deposito C and the other one between the deposito A and B. The model shows that two dehumidifiers with an airflow rate of 500 m³/h and a dehumidification capacity of 35 l/d at 27°C and 60% allow to maintain the relative humidity below 60%.

In order to take into account different climate conditions, others simulations were made using the CTI (Comitato Termotecnico Italiano) weather file for Perugia, which takes into account data from about ten years before the 2016. The results show that the two dehumidifier are enough to maintain RH below the 60% also in these representative conditions.

In the last two years, to mitigate the high level of RH during summer, the library staff opened the exterior windows (three windows on deposito A and only a window on deposito B) on the last days of spring and then closed them on the first days of autumn. Even if this operation guaranteed a best ventilation, if compared to winter, and a natural dehumidification of deposit during sunny days, it can cause rise of indoor RH on rainy days and during the night. The model has confirmed this hypothesis and it was used to evaluate different modes of the exterior windows opening. In the first one, the opening happens during the central hours of the day (from 11 am to 4 pm), and in the other one the windows were opened from 6 pm to 8 am. By comparing the different simulations, a valuable difference both in terms of peak values and of daily maximum variation of RH was observed. Indeed, daily opening allowed more stable RH values and lower values when compared to past situation (always opened in summer) and to the night opening (Figure 11), even if the values are still out of the optimal range.

Figure 11. Deposito C, comparison trend of RH during the month of July, hourly frequency.

Red: 2018 trend (always open during summer) - Blue: trend with daily opened - Green: trend with nocturnal opening



For the above mentioned reasons, windows should be equipped with an automatic opening system. This system could be controlled by a specific algorithm, developed on the basis of the results of the model. Control system should open the windows only when the indoor sensor measures a RH out of

the range (40% ÷ 60%) and when the outdoor absolute humidity is enough lower or higher than the indoor for bring it back within the limits. This solution could ensure, when the outdoor conditions are adequate, not only the air exchange rate suggested by UNI-EN 15757:2010 (maximum 0,04 h⁻¹ or 1 per day) but also a passive control of RH that can help the dehumidification system, which is anyway necessary when the climate conditions do not allow the opening of the windows.

5. Conclusions and future developments

The results of monitoring campaign showed that pollutants and lighting are adequate for book conservation. However, depending on the outdoor wheatear conditions, values of relative humidity for a high percentage of time are outside the ranges suggested by the national and international standards for conservation for books, especially in summer (peak value of about 96%).

Therefore, to prevent growth and development of fungi and bacteria and to ensure the correct conservation of the book heritage, a humidity control system and a ventilation system or a management of window opening (the windows are opened from June to October at present) are needed. However, the ventilation and dehumidification system should not strictly modify the indoor microclimatic conditions, because this could lead to worse conditions for conservation. For this reason, in order to design the system, a numerical model was developed and validated by using experimental data. Thanks to thermodynamic simulations some interventions were investigated and a dehumidification system was designed. The model confirmed also the effectiveness of the closing of the opening on the wall between deposito C and the basement. Finally, the feasibility of a new controlled opening of windows system was preliminarily investigated: a simple opening during all the summer season is done by the library staff at present, whereas the simulations showed that an opening during the central hours of the day (from 11 am to 4 pm) could improve the indoor conditions for conservation.

Starting from the main findings of this paper, future works should focus on the ventilation system (natural or mechanical) development and optimization by using the validated building model.

Acknowledgements

The authors wish to thank Laura Filippuci for her precious contribution during the experimental campaigns and Francesca Serenelli (Responsible for “Mario Marte” Library, University of Perugia) and the Library staff for their willingness to provide useful information and to grant access to the Library during the experimental campaign.

References

1. Balocco, C. *et al.* Indoor microclimatic study for Cultural Heritage protection and preventive conservation in the Palatina Library. *J. Cult. Herit.* (2016). doi:10.1016/j.culher.2016.05.009
2. Bülow, A. E., Colston, B. J. & Watt, D. S. Preventive conservation of paper-based collections within historic buildings. *Stud. Conserv.* (2014). doi:10.1179/sic.2002.47.s3.006

3. Fabbri, K. & Pretelli, M. Heritage buildings and historic microclimate without HVAC technology: Malatestiana Library in Cesena, Italy, UNESCO Memory of the World. *Energy Build.* (2014). doi:10.1016/j.enbuild.2014.02.051
4. Pasquarella, C. *et al.* A multidisciplinary approach to the study of cultural heritage environments: Experience at the Palatina Library in Parma. *Sci. Total Environ.* (2015). doi:10.1016/j.scitotenv.2015.07.105
5. Pretelli, M., Fabbri, K., Ugolini, A. & Milan, A. Indoor Microclimate effect on heritage buildings: the case study of Malatestiana Library. *Built Herit. 2013. Monit. Conserv. Manag.* (2013).
6. Sahin, C. D., Coşkun, T., Arsan, Z. D. & Gökçen Akkurt, G. Investigation of indoor microclimate of historic libraries for preventive conservation of manuscripts. Case Study: Tire Necip Paşa Library, İzmir-Turkey. *Sustain. Cities Soc.* (2017). doi:10.1016/j.scs.2016.11.002
7. Adcock, E. P. Ifla Principles for the Care and Handling of Library Material. *Preservation* (1998).
8. ASHRAE. *ASHRAE Handbook - HVAC Applications (SI) - Chapter: Museums, Galleries, Archives, and Libraries.* Ashrae (2011).
9. UNI 10829:1999, Beni di interesse storico-artistico. Condizioni ambientali di conservazione. Misurazione ed analisi (Italian).
10. UNI-EN 15757:2010, Conservation of Cultural Property - Specifications for temperature and relative humidity to limit climate-induced mechanical damage in organic hygroscopic materials.
11. UNI 10969:2002, Beni culturali - Principi generali per la scelta e il controllo del microclima per la conservazione dei beni culturali in ambienti interni (Italian).
12. UNI-EN 15759-2:2018, Conservation of cultural heritage - Indoor climate – Part 2: Ventilation management for the protection of cultural heritage buildings and collections.
13. Martens, M. Climate risk assessment in museums: degradation risks determined from temperature and relative humidity data. *Build. Environ.* (2012). doi:10.1016/S0168-583X(03)00650-5
14. Mašková, L., Smolík, J. & Ďurovič, M. Characterization of indoor air quality in different archives – Possible implications for books and manuscripts. *Build. Environ.* (2017). doi:10.1016/j.buildenv.2017.05.009
15. Rajčić, V., Skender, A. & Damjanović, D. An innovative methodology of assessing the climate change impact on cultural heritage. *Int. J. Archit. Herit.* (2018). doi:10.1080/15583058.2017.1354094
16. Schito, E., Dias Pereira, L., Testi, D. & Gameiro da Silva, M. Data of temperature and relative humidity in a historic library in Portugal. *Data Br.* (2019). doi:10.1016/j.dib.2019.103788
17. Schito, E., Dias Pereira, L., Testi, D. & Gameiro da Silva, M. A procedure for identifying chemical and biological risks for books in historic libraries based on microclimate analysis. *Journal of Cultural Heritage* (2018). doi:10.1016/j.culher.2018.10.005
18. Andretta, M., Coppola, F. & Seccia, L. Investigation on the interaction between the outdoor environment and the indoor microclimate of a historical library. *J. Cult. Herit.* (2016). doi:10.1016/j.culher.2015.07.002
19. Muñoz-González, C. M., León-Rodríguez, A. L. & Navarro-Casas, J. Air conditioning and passive environmental techniques in historic churches in Mediterranean climate. A proposed method to

- assess damage risk and thermal comfort pre-intervention, simulation-based. *Energy and Buildings* (2016). doi:10.1016/j.enbuild.2016.08.078
20. Grunewald, J. & Kikkawa, Y. An integral building simulation method for evaluation of indoor climate applied to mold risk inside a library building. *HVAC R Res.* (2011). doi:10.1080/10789669.2011.594776
21. Tronchin, L. & Fabbri, K. Energy and microclimate simulation in a heritage building: Further studies on the Malatestiana Library. *Energies* (2017). doi:10.3390/en10101621
22. Stamponi, E. Monitoraggio dei parametri microclimatici e proposte di intervento impiantistiche per la conservazione del patrimonio librario della biblioteca di Agraria di Perugia, Master Degree Thesis, University of Perugia, 2018 (Italian).
23. Filippucci, L. Conservazione del patrimonio librario della biblioteca di Agraria di Perugia: indagine sulle condizioni microclimatiche interne e sviluppo di un modello di regressione lineare per la previsione della richiesta di deumidificazione. Master Degree Thesis, University of Perugia, 2018 (Italian).
24. Laboratorio di biologia del restauro, Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale - Università degli Studi di Perugia, Analisi microbiologica presso il deposito della biblioteca di agraria "Mario Marte": indagine preliminare relativa all'identificazione di microfunghi su materiale librario e monitoraggio della componente aerosporologica in ambienti indoor, 2015 (Italian).
25. Montanari, M., Melloni, V., Pinzari, F. & Innocenti, G. Fungal biodeterioration of historical library materials stored in Compactus movable shelves. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* (2012). doi:10.1016/j.ibiod.2012.03.011
26. EN 15759-2:2018. Conservation of cultural heritage - Indoor climate - Part 2: Ventilation management for the protection of cultural heritage buildings and collections.
27. Buratti, C., Moretti, E., Belloni, E. & Cotana, F. Unsteady simulation of energy performance and thermal comfort in non-residential buildings. *Build. Environ.* 59, (2013).
28. American Society of Heating, Ventilating, and Air Conditioning Engineers (ASHRAE). Guideline 14-2014, Measurement of Energy and Demand Savings; Technical Report; American Society of Heating, Ventilating, and Air Conditioning Engineers: Atlanta, GA, USA, 2014.

XIX Congresso Nazionale CIRIAF

Energia e Sviluppo Sostenibile

A numerical model for the design of a climatic chamber for simulating moderate temperature and high humidity

Paolo Valdiserri ^{1,*}, Eugenia Rossi di Schio ¹, Valda Rondelli ² and Enrico Capacci²

¹ Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, Department of Industrial Engineering DIN, Viale Risorgimento 2, I-40136 Bologna, Italy

² Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, Department of Agricultural and Food Sciences, Viale Fanin 50, I-40127 Bologna, Italy

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: paolo.valdiserri@unibo.it

Abstract: In the present paper, we develop a numerical analysis supporting the design of a climatic chamber suitable for tracked and wheeled tractors, i.e. having measures 5 m x 8 m x 4 m (length x width x height). Reference is made to standard summer conditions (32°C dry bulb and 25°C wet bulb), i.e. the tractor dissipates thermal power in a climatic chamber that reproduce summer temperature and humidity conditions. The numerical analysis is performed by employing Matlab-Simulink, to simulate the behavior of transient systems. First, the balance equations are written with reference to the 5 blocks that can describe the climatic chamber. Then two different regimes are investigated. First, the period is considered in order to reach the prescribed conditions for the climatic test chamber. Then, after this preparation period, the tractor's engine is supposed to work and the tractor's conditioning system is tested in order to maintain safe working conditions in the cabin

Keywords: Climatic chamber; numerical analysis; transient analysis; Matlab Simulink; dynamic programming

1. Introduction

Very often the design of a climatic chamber is based on experience and left to the companies charged for its realization. However, especially when dimensions are big and if it is supposed to work for long lasting measures and with high heat loads to be removed, realization costs are huge and a

detailed design is compulsory. This happens, for instance, for tractors. In fact, in order to achieve the compulsory European type approval for tracked and wheeled agricultural tractors, the European Regulation 167/2013 has to be considered and the approval test for heating, cooling and conditioning systems requires experimental measures according to the European Delegated Regulation EU 2015/208 [1-2]. In detail, the heating and cooling devices have to be experimentally tested basing the measurements on the procedure foreseen in the ISO 14269-2:1997 standard [3]. The ISO standard provides a particular heavy weather conditions, and for long periods of time.

Indeed, particular attention has to be paid to the design of chambers suitable for tracked wheeled tractors, because they display big thermal inertia. In fact, during the measure time the tractor engine has to be working and the heat load must be removed. Moreover, since the exhaust gases are immediately removed from the climatic chamber, particular attention has to be paid to the correct estimation of the heat load to the climatic chamber, especially due to convection and radiation [4-6].

Recently, the authors of the present paper presented the transient simulation for the design of a climatic chamber modeling the winter conditions [7]. In fact, for winter case the ISO standard prescribes a measure with ambient temperatures between -12 °C and the lowest ambient temperature at which the machine is designed to operate.

In the present paper, we aim to enhance the analysis presented in [7] with reference to summer season, i.e. by assuming an air temperature inside the chamber of 32°C dry bulb and 25°C wet bulb, as prescribed by the European Regulation 167/2013. We perform a dynamic numerical analysis by employing Matlab-Simulink: as is well known, in the literature, this approach has been widely introduced, also with reference to buildings [8–10].

2. Mathematical Model

In the present paper we aim to develop a numerical transient analysis supporting the design of a climatic chamber. A sketch of the system is reported in Fig. 1. The mathematical model is somehow similar to that presented in 7, but it displays some differences, in order to fit the reproduction of summer conditions.

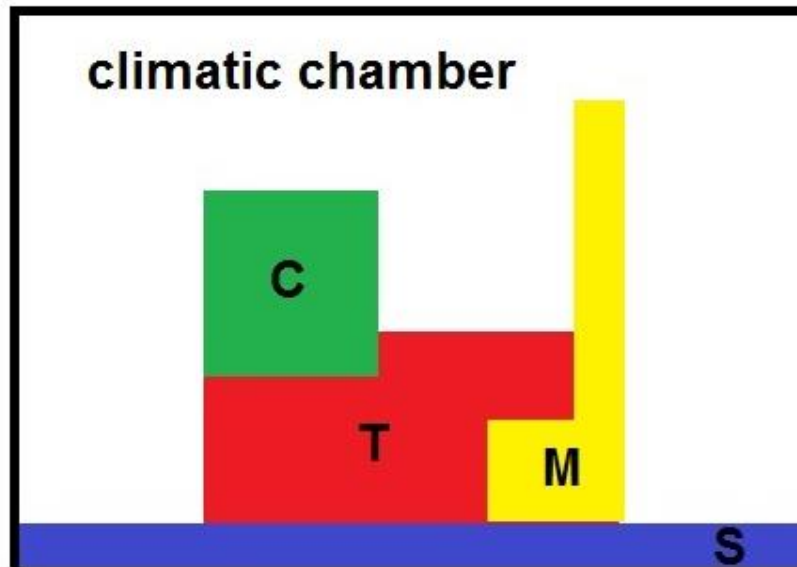
Let us consider a climatic chamber having a surface of 5x8 m² and a height of 4 m. Indeed, the volume of the chamber is 160 m³.

Let us assume that the vertical and horizontal (roof) boundaries, for a total surface of $S_S=144$ m² that bounds the climatic chamber, are insulated, made of sandwich panels of 180 mm and displaying a thermal conductivity of 0.025 W m⁻¹ K⁻¹.

On the floor there is a screed with mass approximately $M_S=12000$ kg, since a thickness of 0,2 m is estimated, and the conductivity of the concrete screed is 0.8 W m⁻¹ K⁻¹, the specific heat is $c_S=980$ J kg⁻¹ K⁻¹. The screed block must satisfy the following balance equation:

$$-S_S h [T_S - T_A] = M_S c_S \frac{dT_S}{dt}, \quad (1)$$

where T is the temperature and t is the time, and the subscripts S and A stay respectively for screed and air in the climatic chamber. In eq. (1) we assume T_S as the mean temperature on the screed.

Figure 1. Sketch of the model

In order to analyse the climatic chamber performance, inside it we model an agricultural tractor with a mass of 10000 kg and mounted with a 100 kW engine power.

As shown in Fig. 1, the track is described through three different blocks, named M, T and C. Block M, with $M_M=500$ kg, represents the part of the tractor that warms, due to the engine work, while block T, with $M_T=9500$ kg represents the part of the tractor than does not warm, because of its big thermal inertia. The tractor in the climatic chamber is required to run at the rated engine speed, with a maximum load of no more than 20 % of the maximum rated net engine power [4]. Block C represents the tractor's cabin, with $M_C=5$ m³, furnished with an internal air-conditioning system (with cooling power Q_C).

The three blocks describing the tractor must satisfy the following balance equations:

$$Q_M - S_M h[T_M - T_A] = M_M c_M \frac{dT_M}{dt}, \quad (2)$$

$$-S_T h[T_T - T_A] = M_T c_T \frac{dT_T}{dt}, \quad (3)$$

$$Q_C + Q_{rad} - S_C C_C [T_C - T_A] = M_C c_A \frac{dT_C}{dt}. \quad (4)$$

In Eqs. (2) – (4), we assume that the mass $M_M=500$ kg and $M_T=9500$ kg are both made of steel, so that $c_M=c_T= 550$ J kg⁻¹ K⁻¹. The surfaces overpassed by heat transfer are estimated in $S_C=10$ m², $S_T=10$ m², $S_M=100$ m².

With reference to the tractor's cabin, it is full of air ($c_A=1006 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$) and the windows have thermal conductance $C_C=5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Moreover, in eq. (4) the contribution of $Q_{rad} = 1 \text{ kW}$ is considered, since the heating of the climatic chamber, in order to reach and maintain the summer conditions, is done with an infrared lamp. We underline that this contribution was not considered in case of winter climatic chamber conditions, as clear in the mathematical model presented in [7].

Moreover, a mass exchanged of $m_{ext}=150 \text{ kg/hour}$ of conditioned air is assumed between the climatic chamber and the outside. A cooling system having power 400 kW extracts heat from the chamber. The direct expansion chiller group displays in the climatic chamber is the evaporator with refrigerating fluid.

According to the above description, the air in the climatic chamber can be described by a block fulfilling the balance equation:

$$Q + S_M h[T_M - T_A] + S_T h[T_T - T_A] + S_C C_C [T_C - T_A] + S_S h[T_S - T_A] + S_A U_A [T_{ext} - T_A] + \dot{m}_{ext} c_A [T_{ext} - T_A] = M_A c_A \frac{dT_A}{dt}, \quad (5)$$

where $Q = Q_M + Q_C + Q_{rad}$.

In the present analysis, the power in order to keep the prescribed wet bulb temperature is not taken in account.

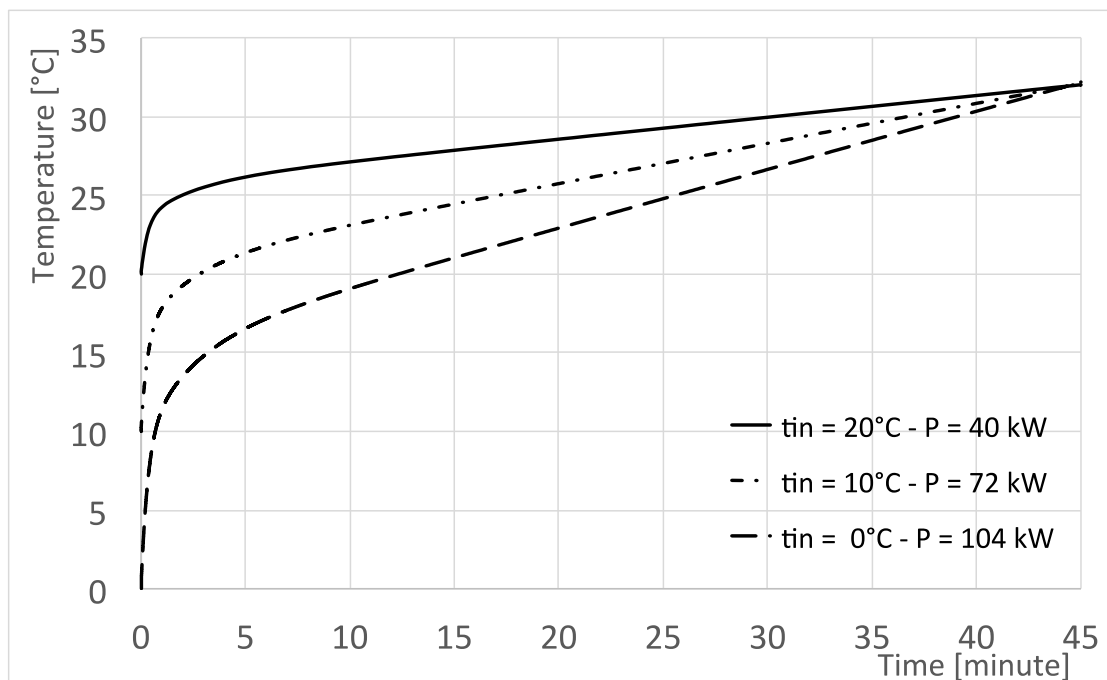
3. Discussion of the results

In order to simulate dynamically the behavior of the climate chamber, with particular attention to the chilling power Q and to the tractor's cabin temperature, let us assume that we refer to the following experimental measure regime.

First, we assume that the tractor is located inside the chamber and that a previous measure in the cabin in "winter conditions" may have occurred. For this reason, the initial temperature of the air in the cabin may be low. We will investigate three cases, $T_{in}=0^\circ\text{C}$, $T_{in}=10^\circ\text{C}$ and $T_{in}=20^\circ\text{C}$ and suppose to estimate to reach the prescribed conditions for the air chamber temperature, i.e. 32°C dry bulb and 25°C wet bulb, in 45 minutes time.

In order to reach this goal we switch on the heating system and we switch on the tractor's engine (if it needs), at rated engine speed without load with hourly consumption estimated in 8 kg/hour of diesel fuel. Figure 2 shows the time-dependence of the mean temperature distribution in the climatic chamber at the three initial temperature of the air and the different power (P) that it needs in the three cases in order to reach the air temperature of 32°C after 45 minutes.

Figure 2. Mean temperature distribution in the chamber, versus time, in order to reach the prescribed conditions



After this preparation period, we check that the prescribed conditions are reached and the 60 minutes measure starts.

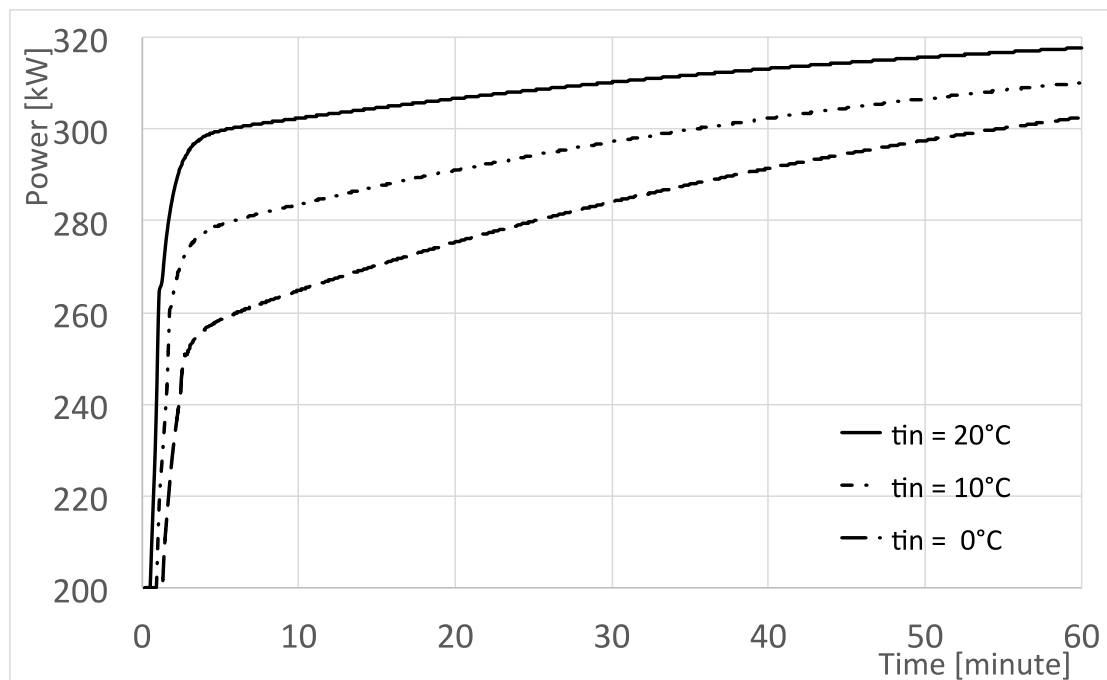
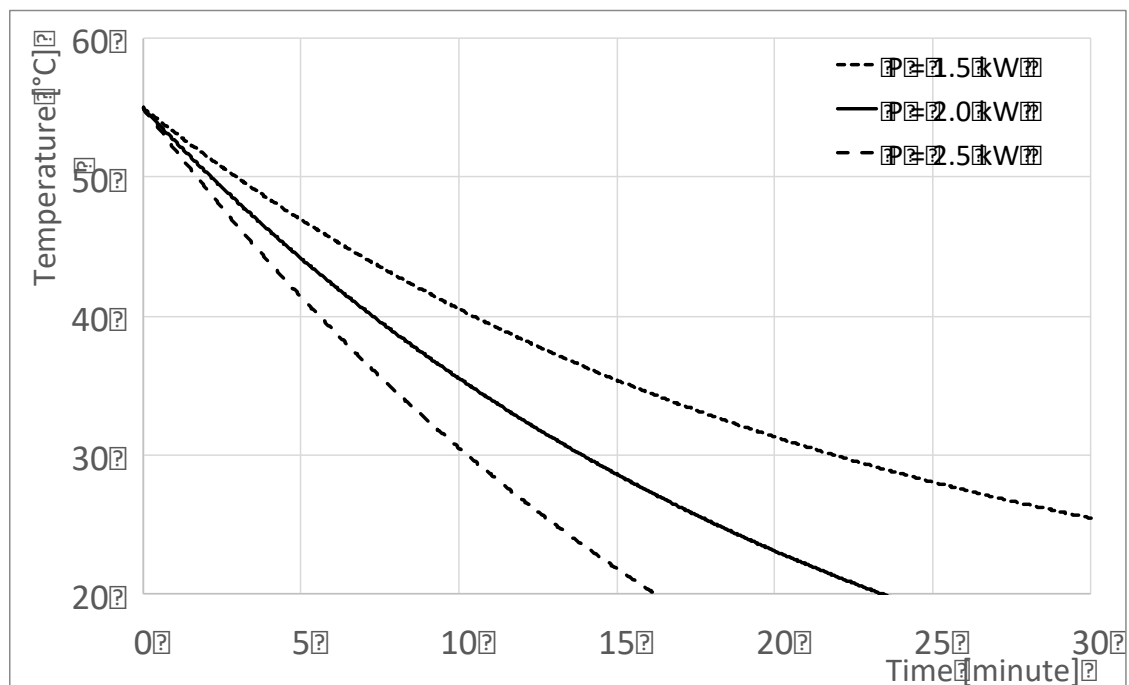
We increase the tractor's engine work to 300 kW.

In order to keep the air temperature at 32°C , a cooling system having maximum power 400 kW extracts heat from the chamber. The direct expansion chiller group displays in the climatic chamber is the evaporator with refrigerating fluid.

The initial temperature strongly affects the measuring conditions as well, as clearly reported in Fig. 3, where the chilling power, dynamically controlled, is reported during measuring time.

The figure displays the time-dependence of the cooling power provided by the evaporator in the climatic chamber in order to maintain the temperature of the air close to 32°C , assuming the three different values for the initial temperature (and $t=0$ corresponds to the exact moment when the tractor's engine is switched on to the power required by the regulation). The figure shows that the power increases as a function of time and it is higher when the starting temperature is greater.

In Fig. 4, the tractor's cabin temperature is reported with reference to the measuring period. Figure 4 shows the temperature in the cabin, versus time for three different values assumed by the cooling power Q_C , $t=0$ corresponds to the exact moment, after 1 hour, when the it starts to switch on the air conditioning system.

Figure 3. Chilling power during measuring time, versus time**Figure 4.** Temperature distribution in the tractor'cabin, during measure, versus time

5. Conclusions

In the present paper a numerical transient simulation of the behavior of a climatic chamber is presented. Reference is made to a big chamber, suitable for the testing of tractors according to the European regulation EU 167/2013 and to the ISO 14269-2:1997 regulation.

First, the balance equations are written by considering five different blocks. Then the solution is obtained by employing the software package Matlab Simulink.

Reference is made to particularly heavy summer conditions, as prescribed by the above mentioned European regulation, and first the prescribed conditions of air temperature in the chamber are reached, then the testing time is numerically simulated.

The presented analysis shows that a transient analysis may be a useful support in order to simulate, and indeed design, a climatic chamber, particularly in the special case of huge dimensions.

However, the present paper presents a preliminary analysis of the topic. Further analyses and developments may include, for instance, the role of humidity.

References

1. European REGULATION EU 167/2013 on the approval and market surveillance of agricultural and forestry vehicles, 2013
2. European COMMISSION DELEGATED ACT (EU) 2015/208 supplementing EU Regulation 167/2013 with regard to vehicle functional safety requirements for the approval of agricultural and forestry vehicles, 2015
3. ISO 14269-2:1997 Tractors and self-propelled machines for agriculture and forestry - Operator enclosure environment - Part 2: Heating, ventilation and air-conditioning test method and performance, 1997
4. Bourhis, G., Leduc, P., Energy and Exergy Balances for Modern Diesel and Gasoline Engines, Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Vol. 65, pp. 39-46, 2010
5. Okamoto, T., Uchida, N., New Concept for Overcoming the Trade-Off between Thermal Efficiency, Each Loss and Exhaust Emissions in a Heavy Duty Diesel Engine, SAE Int. J. Engines Vol. 9, 2016
6. Chintalaa, V., Kumara, S., Pandey, J.K., A technical review on waste heat recovery from compression ignition engines using organic Rankine cycle, Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 81, pp. 493–509, 2018
7. Rossi di Schio, E. Valdiserri, P. Rondelli, V. Capacci, E., A numerical model for the design of a climatic chamber, 13th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems Sdewes, Palermo, Italy, 2018
8. Lorenzini, M; Valdiserri, P.; Pagnoni, M., The role of the saver in a HPLCs heat transfer process: A transient analysis, JOP Conference Series Vol 796, 796, pp. 1 – 9, 2017
9. van Schijndel, A.W.M., Integrated modeling of dynamic heat, air and moisture processes in buildings and systems using SimuLink and COMSOL, Building Simulation Vol. 2, pp 143–155, 2009

10. Mendes, N., Oliveira, G.H.C., de Araújo, H.X., Building thermal performance analysis by using Matlab/Simulink, Seventh International IBPSA Conference Rio de Janeiro, Brazil August 13-15, 2001

XIX Congresso Nazionale CIRIAF

Energia e Sviluppo Sostenibile

Experimental Investigation of Solar Reflectance Directional Dependence of Retroreflective Materials

Gabriele Battista ^{1,*}, Roberto de Lieto Vollaro ¹, Andrea Vallati ²

¹ University of Roma TRE, Department of Engineering, via della Vasca Navale 79, 00146 Rome, Italy

² Sapienza University of Rome, Department of DIAEE, via Eudossiana 18, 00184 Rome, Italy

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: gabriele.battista@uniroma3.it

Abstract: In the last years innovative building envelope materials were studied in order to mitigate the urban heat island phenomenon in cities. Among them, cool materials represent a valid solution to achieve this objective. These materials are characterized by high solar reflectance (high ability to reflect solar incident radiation) and high thermal emittance (high ability to emit heat in the infrared wavelength). Another way to reduce the urban heat island effect is the adoption of retroreflective materials on the building façades, in order to reduce the amount of solar radiation entrapped within the urban fabric. The retroreflective materials have a particular surface conformation that allows to reflect the solar radiation back in the same direction of the incident radiation. In this case, the temperature of the surfaces inside an urban canyon should have lower values compared with the case with common construction materials. Consequently, also the air temperature inside the urban canyon has low values with significant advantages on outdoor thermal comfort and on building thermal energy demands. In this work, the solar reflectance directional dependence of a commercial retroreflective material was investigated with a gonireflectometer. Furthermore, a scaled urban canyon was built in order to assess the effects of this material. The experimental characterization showed that retroreflective materials could be applied on building façades in order to mitigate the UHI effect inside cities.

Keywords: Retroreflective materials; Solar loads; Gonireflectometer; Urban canyon; Urban heat island.

1. Introduction

In the last years people move from rural areas to cities. Effects of this phenomenon are related to the increase of energy consumption and air pollutant that reduce the human health quality in cities. The development of urban fabric involves the modification of the thermal fluid-dynamic field of cities. This factor leads to worse the energy performances of buildings. As a matter of fact, buildings energy performances are highly correlated with the envelope features and outdoor climatic conditions. Many intervention methods on building envelope were tested and proposed during the last decade concerning the increase in insulation level [1-3], passive strategies of ventilation [4,5], innovative shading systems for windowed components [6] and reflective materials [7].

The urbanization has lead to the increase of urban heat island effect in cities. There are several strategies to mitigate the urban heat island effects. The most commonly used is to increase the solar reflectance of built surfaces [8,9]. The optical–radiative response of building materials influence the air temperature inside urban canyons, defined as the space between building that line up continuously on both sides of the street [10].

Retro-reflective materials (from now on called RR) can improve the building temperature conditions by reflecting the solar radiation back in the same incident direction, reducing the amount of solar radiation entrapped within urban canyons.

In this work two experimental analysis on RR were done in order to investigate the directional properties and the effects on a scaled urban canyon.

2. Materials and methods

Optical measurements were carried out on a particular material with a highly reflective pigment combined with glass microspheres.

The paint has a gray color. The retro-reflective effect is activated when the painted surface is hit by a light beam. The glass microspheres have a diameter between 35 μm and 50 μm , with a 95% roundness and a refractive index of 2.2. Moreover, the microspheres are coated with an aluminum film which improves their retro-reflective properties.

The material sample is shown in Figure 1.

The directional proprieties of the RR sample used in this paper was investigated through an experimental analysis with a gonireflectometer. The reflectance shape of the RR was got at four incidence angles of light beam: near normal (8°), 30° , 45° and 60° . The incidence angle is considered 0° when the light beam hits a surface normally, while is 90° when the light beam is parallel to it.

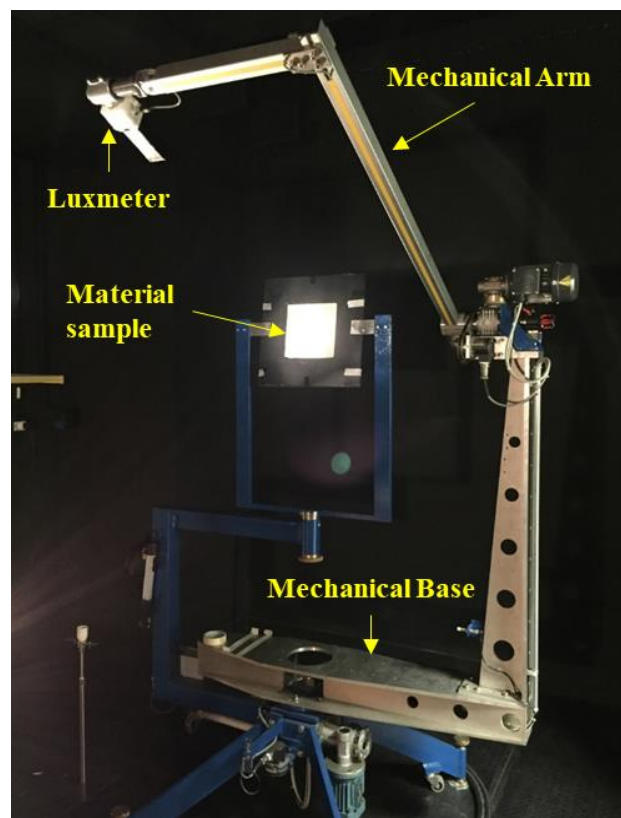
The used optical bench is shown in Figure 2 and is composed by the following elements:

- A tungsten halogen lamp with adjustable power, ranging from 100 to 400 Watt and covering the visible spectrum emission. A system composed by three lens with different focal distance assures the focus and the collimation of the beam on the sample surface;
- A mechanical system of two rotational axes (mechanical arm and mechanical base – see Figure 2) equipped with a luxmeter able to scan the space around the sample drawing a sphere centered on the sample-holder. The luxmeter measuring range is confined between 0 and 5000 Lux with 1 Lux of resolution;
- The sample-holder can rotate in order to vary the beam incidence angle.

Figure 1. Retro-Reflective material sample used in this analysis.



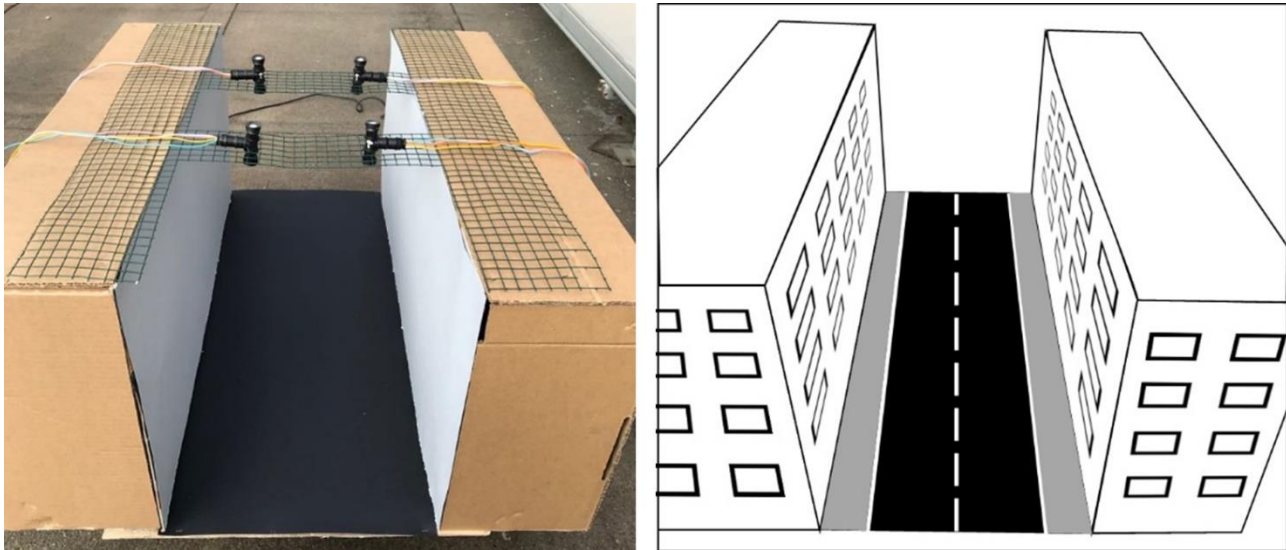
Figure 2. Gonioreflectometer.



The scaled urban canyon is made with two buildings with a height of 32 cm and a length of 74 cm. The width is 30 cm. The building façades are made by a gray paper with a reflectivity of 0.38, while the street is made by a black paper with a reflectivity of 0.22. At the top of the urban canyon, four sensors

are used. Each sensor is constituted by two photodiode able to measure the light beam entering and exiting the urban canyon. The sensors have a spectral range from 380 to 1150 nm, a full scale of 120000 lux and an accuracy of 1%. In Figure 3 is shown the experimental setup.

Figure 3. Scaled urban canyon used in this analysis.



When an opaque body is hit by a light beam, a part of the energy is reflected and a part absorbed.

The reflection coefficient of a material measured with the gonioreflectometer is calculated with the following equations:

$$\rho = \frac{\phi_r}{\phi_i} \quad (1)$$

$$\phi_r = \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} \int_{\varphi=0}^{\varphi=\pi} E \cdot r^2 \cdot \sin \varphi \, d\theta \, d\varphi \quad (2)$$

Where ϕ_r is the luminous flux reflected by the material sample and the ϕ_i is the luminous flux incident to the material sample.

3. Results and discussion

The RR sample shown in Figure 1 was analysed with the gonioreflectometer in order to highlight the reflectivity directional proprieties. This experimental investigation was done for different incident angle of the light beam: near normal (8°), 30°, 45° and 60°. The results are shown in Figure 4: a red line is referred to near normal (8°), blue line is referred to 30°, green line is referred to 45° and purple line is referred to 60°.

As is clear by observing the polar graph that the material sample have a maximum reflectivity direction at the same of the incident direction for all the incident angle of the light beam. The maximum illuminance decreases with the increase of the incident angle of the light beam. It is worth to notice that, for angle different from incident angle of the light beam, there is a diffusive behavior that is the

same from 8° to 45° . For the case of 60° , the diffusive behavior has a peak near the specular angle of the incident light beam.

Overall, this analysis allows to consider this sample as a retro-reflective material.

Considering the experimental data for the semisphere reflectivity distribution, it is possible to calculate the reflection coefficient of this material with the equations 1 and 2. The reflectivity of the RR is shown in Table 1. The results shown that the reflectivity increases with the increase of the incident angle of the light beam.

Table 1. RR reflectivity for different incident angle of the light beam.

	8°	30°	45°	60°
RR	0.366	0.374	0.372	0.404

In order to assess the effects of the RR sample measured with the gonireflectometer, an experimental analysis was done in a scaled urban canyon for two days: 13 and 14 March 2018. Figure 5 shows the results of this analysis where blue crosses are referred to the RR configuration and red triangles are referred to the gray paper configuration called CR (constant-reflectance material). In Figure 5 are shown the entering over exiting ratio of global solar radiation for each entering values measured with the four sensors shown in Figure 3. It is worth to notice that for the most of cases the RR have an exit over entering ratio higher than CR. As a matter of fact, the mean ratio is 0.215 for RR and 0.201 for CR denoting that the RR can reflect much more radiation out from the scaled urban canyon. This fact can lead to a mitigation of the air temperature between the buildings.

Figure 4. Reflectivity shape at the plane normally to the material sample of the RR used in this analysis. Different incidence angles of light beam are shown: Red line is referred to near normal (8°), Blue line is referred to 30° , Green line is referred to 45° and Purple line is referred to 60° .

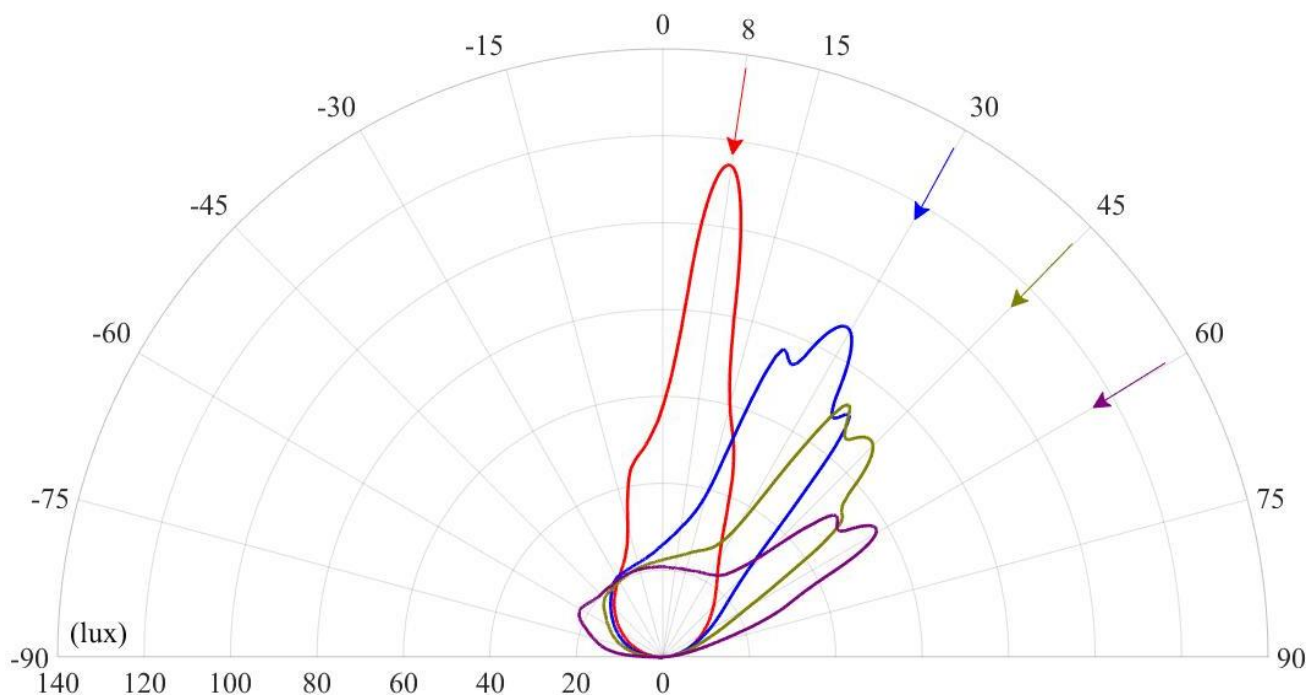
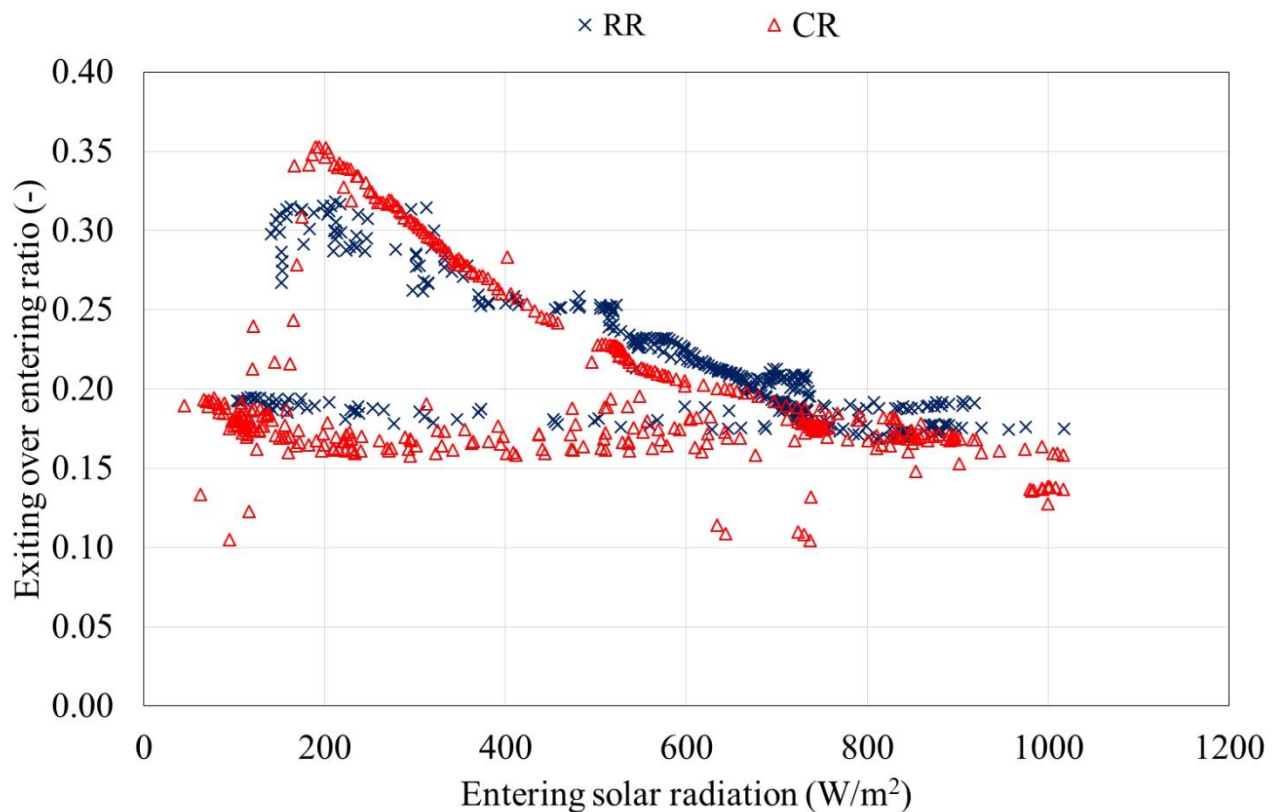


Figure 5. Scaled urban canyon exiting over entering ratio of global solar radiation. Red triangles are referred to the gray paper configuration and blue crosses are referred to the RR configuration.



4. Conclusions

One of the main techniques used to mitigate the urban heat island in cities is the adoption of cool material. Usually this one is a diffusive material that reflect the radiation in all the direction in quite the same intensity. The cool effect is evident if this material is used horizontal surfaces like roofs. In vertical surfaces like the building's façades, the high reflectance of cool materials leads to reflect the solar radiation inside urban canyon. In the last year research on retro-reflective material are done in order to avoid this problem. These materials can reflect the radiation in major part back to the incident direction. In this paper was investigated a particular RR constituted with glass microspheres. The gonioreflectometer experimental analysis highlight the directional proprieties of this RR and the high reflectivity of radiation in the same direction of the incident light beam. Furthermore, the maximum illuminance decreases with the increase of the incident angle of the light beam, and the reflectivity increases with the increase of the incident angle of the light beam from 0.366 at 8° to 0.404 at 60°.

The scaled urban canyon analysis is used to compare the effects on two buildings lined up continuously on both sides of idealized street of a diffusive material (CR) and a retro-reflective material (RR). The entering over exiting ratio of global solar radiation for each entering value was evaluated. The mean ratio is 0.215 for RR and 0.201 for CR denoting that the RR can reflect much more radiation out from the scaled urban canyon.

References

1. Baetens, R.; Jelle, B.; A., G. Aerogel insulation for building application: a state-of-the-art review. *Energy and Buildings* **2011**, 43 (4), 761–769.
2. Salata, F.; Golasi, I.; de Lieto Vollaro, E.; Bisegna, F.; Nardecchia, F.; Coppi, M.; Gugliermetti, F.; de Lieto Vollaro, A. Evaluation of different urban microclimate mitigation strategies through a pmv analysis. *Sustainability* **2015**, 7 (7), 9012–9030.
3. Battista, G.; Carnielo, E.; de Lieto Vollaro, R. Thermal impact of a redeveloped area on localized urban microclimate: A case study in rome. *Energy and Buildings* **2016**, 133, 446–454.
4. Kolokotroni, M.; Webb, B.C.; Hayes, S.D. Summer cooling with night ventilation for office buildings in moderate climates. *Energy and Buildings* **1998**, 27 (3), 231–237.
5. Salata, F.; Alippi, C.; Tarsitano, A.; Golasi, I.; Coppi, M. A first approach to natural thermoventilation of residential buildings through ventilation chimneys supplied by solar ponds. *Sustainability* **2015**, 7 (7), 9649–9663.
6. Coppi, M.; Quintino, A.; Salata, F. Fluid dynamic feasibility study of solar chimney in residential buildings. *International Journal of Heat and Technology* **2011**, 29 (1), 1–5.
7. Kirimtut, A.; Koyunbaba, B.; Chatzikonstantinou, I.; Sariyildiz, S. Review of simulation modeling for shading devices in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2016**, 53, 23–49.
8. Bretz, S.; Akbari, H.; Rosenfeld, A. Practical issues for using solar-reflective materials to mitigate urban heat islands. *Atmospheric Environment* **1998**, 32, 95–101.
9. Taha, H.; Akbari, H.; Rosenfeld, A.; Huang, J. Residential cooling loads and the urban heat island: The effects of albedo. *Building and Environment* **1988**, 23, 271–283.
10. Li, L.; Yang, L.; Zhanh, L.; Jiang, Y. Numerical study on the impact of ground heating and ambient wind speed on flow fields in street canyons. *Advances in Atmospheric Sciences* **2012**, 29 (6), 1227–1237

XIX Congresso Nazionale CIRIAF

Energia e Sviluppo Sostenibile

La manutenzione degli alvei fluviali per la prevenzione dei dissesti idrogeologici: quadro normativo, impatti socio-economici e ambientali, criticità e nuove opportunità per il territorio

Alessandro Petrozzi^{1,*}, Serena Gallicchio¹, Luca Fondacci^{1,2} Francesco Strangis¹ and Mattia Gelosia¹

¹ CIRIAF, Centro Interuniversitario di ricerca sull'Inquinamento e sull'ambiente m. Felli, Università degli Studi di Perugia, Via G. Duranti n. 67 06125 Perugia

² Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Ferrara, Via della Ghiara n. 36, 44121, Ferrara

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: petrozzi@crbnet.it

Abstract: La carenza di servizi di manutenzione degli alvei fluviali ha comportato, negli ultimi decenni, un incremento del rischio idraulico dei bacini idrografici, con conseguenze disastrose in termini di sicurezza e fruibilità del territorio, con ricadute socio-economiche ed ambientali nelle zone più vulnerabili. Il CIRIAF-CRB dell'Università di Perugia, in collaborazione con l'Università per Stranieri di Perugia e l'Università della Tuscia di Viterbo, attraverso il progetto di ricerca GEST-RIVER (Gestione Eco-Sostenibile dei Territori a Rischio Inondazione e Valorizzazione Economica delle Risorse) a partire da una ricognizione normativa in materia di alluvioni, sta sviluppando un'articolata attività di ricerca per l'analisi degli impatti socio-economici ed ambientali sul territorio colpito da dissesto idrogeologico, al fine di individuare strategie virtuose per la messa in sicurezza del territorio e, per la parte di sua competenza, mappatura, recupero e manutenzione della biomassa, la sua valorizzazione energetica e la caratterizzazione dei vari sottoprodotti degli interventi, come ad esempio i fanghi di dragaggio del fiume per la produzione di laterizi.

Keywords: biomassa; alveo fluviale; dissesti idrogeologici; impatti ambientali.

1. Introduzione

Il CIRIAF, Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento e sull'Ambiente Mauro Felli dell'Università degli Studi di Perugia con la sua sezione CRB – Centro di Ricerca sulle Biomasse, è partner, assieme all'Università Tuscia di Viterbo e l'Università per Stranieri di Perugia, del progetto

GEST-RIVER finanziato dal MIUR, Ministero dell'Istruzione, Università e della Ricerca inerente l'area di prevenzione del rischio alluvioni a livello degli ecosistemi fluviali, attraverso la definizione di un programma di gestione dei sedimenti a livello di bacino.

Il progetto si inserisce sull'annosa questione della manutenzione fluviale un argomento molto delicato perché coinvolge l'aspetto della sicurezza idraulica con quello dell'impatto degli interventi sull'ambiente, sia floristico che faunistico, che attengono al corso d'acqua all'interno di un progetto di mitigazione dei rischi di esondazione, date le esigue sezioni spesso artificializzate, che molti corsi d'acqua presentano. Il modello che si intende applicare valuta gli aspetti economici, sociali e di sostenibilità ambientale.

L'area pilota considerata è in prima battuta il bacino idrografico del fosso di Montecalvello a Graffignano (VT), un affluente del fiume Tevere, per poi proseguire il progetto di ricerca su un tratto fortemente critico del fiume Paglia, anche al fine di testare e quindi validare i risultati del modello elaborato.

Nell'ambito del progetto di ricerca verranno individuati interventi di riduzione dell'erosione di versante e alla simulazione di strategie di manutenzione d'alveo che prevedano sia il taglio della copertura vegetale che interventi di inerbimento mediante impianti radicali profondi per il contenimento dell'erosione spondale. L'aspetto più innovativo del modello previsto sarà rappresentato dalla sperimentazione di particolari filiere di valorizzazione economica dei materiali organici e inorganici che costituiscono i sottoprodotti dalla manutenzione ordinaria e straordinaria dei bacini idrografici.

In particolare la biomassa legnosa ed erbacea ottenuta da operazioni di pulizia dell'asta fluviale sarà caratterizzata da un punto di vista chimico-fisico e successivamente si procederà all'ottimizzazione di due processi di valorizzazione energetica, relativa alla produzione di bioetanolo e polioili.

Dalla manutenzione straordinaria necessaria a seguito di eventi alluvionali, nasce la disponibilità di rilevanti quantità di materiale inorganico (fanghi e detriti) che, qualora contaminati, devono attualmente essere smaltiti come rifiuti pericolosi, con tutte le relative criticità connesse.

A tale riguardo il progetto intende verificare sperimentalmente la possibilità di recuperare il suddetto materiale all'interno della filiera produttiva dei laterizi, in modo da ottenere un prodotto eco-compatibile.

Infine il modello messo a punto prenderà in esame anche la valutazione della percezione del rischio da parte degli attori che operano sul territorio con l'obiettivo, adottando misure precauzionali e proponendo interventi da effettuarsi in tempo reale e dopo un evento intenso, la riduzione della vulnerabilità e l'aumento della preparazione delle comunità.

2. Vulnerabilità del territorio in presenza di bacini fluviali. Analisi degli impatti socio-economici e ambientali e individuazione di aree di studio rappresentative.

La gestione sostenibile degli assetti idrici, integrata con obiettivi di contenimento del consumo del suolo e di salvaguardia delle relative funzioni ecosistemiche, rappresenta un obiettivo centrale della pianificazione strategica del territorio che utilizza la conoscenza dei pericoli naturali come supporto ai processi decisionali di governo degli ambienti urbani e naturali [1-2].

Si tratta di una pianificazione strategica del territorio che innova la metodologia consolidata [3] frutto della ricerca su scala nazionale condotta dal Centro Ricerche Urbane territoriali e ambientali della Facoltà di Architettura di Ferrara [4].

Infatti, si tratta di un processo pianificatorio che integra la gestione dei sedimenti e la corretta manutenzione delle aree golenali, determinanti per il deflusso delle piene fluviali, con la valorizzazione economica dei materiali organici e inorganici prodotti dalla manutenzione dell'alveo, come la biomassa (legnosa ed erbacea), fanghi e detriti.

In particolare, si propone di costruire uno stato della conoscenza generale delle aree di studio rappresentative, intese come *servizi ecosistemici* (SE), associando la valutazione socio-economica, alla valutazione biofisica. Per la gestione ecosostenibile dei territori e la relativa valorizzazione economica delle risorse si propone in Tab. 1 l'analisi delle seguenti funzioni ecosistemiche:

- 1) qualità degli habitat;
- 2) stoccaggio del carbonio;
- 3) trattamento sedimenti/erosione del suolo;
- 4) produzione legnosa;
- 5) produzione agricola.

Table 1. Ipotesi di schema per analisi qualitative, socio-economiche e biofisiche, dei Servizi Ecosistemici oggetto della ricerca Gest-RIVER.

Funzioni	Input	Strumento	Valorizzazione economica
Qualità habitat	Uso del suolo	Carte uso suolo	€/mq
Stoccaggio carbonio	Quantità di carbonio immagazzinato dagli ecosistemi in termini biofisici	Modello InVEST Carbon <i>Storage sequestration</i>	€/ha
Trattenimento dei sedimenti/ Erosione suolo	Capacità dei diversi usi del suolo di evitare l'asportazione del suolo ed il suo accumulo nei corsi d'acqua	Modello InVEST Sediment delivery ratio model	Costo evitato per il ripristino delle fertilità dei suoli funzionale alla protezione dall'erosione €/ton
Produzione legnosa	Valore economico connesso alle utilizzazioni forestali	Piani forestali	€/ton
Produzione agricola	Valori agricoli medi	Agenzia delle Entrate	€/h
Fonti: elaborazione dell'autore su [5]			

In questo modo, si intende associare la valutazione socio-economica alla valutazione biofisica in modo da definire un quadro di conoscenza qualitativa del SE.

Questa integrazione metodologica, consente l'avanzamento della conoscenza richiesto dal progetto di ricerca GEST-RIVER in relazione sia ai risultati, sia agli obiettivi, sia, infine, alla metodologia. A questo proposito è anche importante sottolineare che quando si fa riferimento alla pianificazione dell'uso del suolo ci si riferisce ad un processo finalizzato a prevedere, in linea di massima, dei risultati che riguardano il contenimento del consumo del suolo e la salvaguardia delle sue funzioni ecosistemiche.

Come noto, le ragioni del binomio “uso del suolo e funzioni ecosistemiche” vanno rintracciate nell'altro binomio caratterizzante l'evoluzione territoriale italiana negli ultimi decenni: crescita e diffusione insediativa nei suoli agricoli marginali (aree montane, costiere e fluviali), con conseguente incremento di fenomeni naturali calamitosi [6-7]. In questo quadro, la pianificazione strategica del territorio che coinvolge in maniera politecnica il governo di area vasta, e che è parte integrante dell'approccio scientifico alla gestione dei rischi naturali, rappresenta la metodologia più efficace per realizzare le analisi degli impatti socio-economici e ambientali, poiché è in grado di aiutare i decisori pubblici a prevenire e ridurre i pericoli naturali sulla base di una metodologia obiettiva e replicabile.

3. Analisi del quadro normativo in materia di alluvioni in Italia

L'inquadramento normativo in materia di alluvioni è stato effettuato a partire dalle normative comunitarie che dettano l'approccio e le linee guida generali, fino alla normativa più vincolante che è quella dell'ente competente territoriale: la regione [8].

Le normative analizzate sono:

- Direttiva 2000/60/CE per un'azione comunitaria in materia di acque quadro legislativo di riferimento per le politiche di tutela e di uso sostenibile delle risorse idriche, con lo scopo di istituire un quadro condiviso a livello europeo per l'attuazione di una politica sostenibile a lungo termine di uso e di protezione per tutte le acque interne, per le acque di transizione e per le acque marino costiere.
- Direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione del rischio di alluvioni, recepita nell'ordinamento italiano con il Dlgs 23 febbraio 2010 n. 49, pone agli enti competenti in materia di difesa del suolo, l'obiettivo di mitigare le conseguenze per la salute umana, per il territorio, per i beni, per l'ambiente, per il patrimonio culturale e per le attività economiche e sociali, derivanti da eventi alluvionali.
- Adempimento agli obblighi imposti dal D.lgs 49/2010 da parte di: Autorità di Bacino di rilievo nazionale (L.183/1989) e Regioni territoriali competenti, come sancito dal D.Lgs. n.219 del 10-12-2010.
- Piani di Assetto Idrogeologico della Regione Lazio, strumento che ha come obiettivo la minimizzazione dei possibili danni connessi ai rischi idrogeologici, al fine di individuare le aree a maggior rischio di esondazione e delimitare gli interventi.

4. Caratterizzazione e valorizzazione di sedimenti e fanghi di drenaggio per la produzione di laterizi

Nell'ambito della valutazione dei sottoprodotti del servizio di manutenzione e gestione del territorio, sono stati eseguiti dei campionamenti dei fanghi del fosso di Montecalvello a Graffignano (VT), per poi poter eseguire le analisi di caratterizzazione mediante analisi termogravimetrica (TGA). Sono stati individuati tre punti di campionamento (Fig. 1) per rendere più omogeneo possibile il campionamento. A sua volta sono stati effettuati prelievi da analizzare con il metodo della quartatura.

Figura 1. Campionamento di fanghi.

Si riportano sotto i risultati della TGA (Tab. 2), da cui si evince una grande presenza di materiale organico sotto forma di volatili secche (circa il 20%). La stessa presenza di materiale organico si evince per l'elevata percentuale di ceneri (24%).

Table 2. Risultati caratterizzazione Termogravimetrica.

	umidità	volatili	ceneri	carbonio fisso	volatili secche	ceneri secche	carbonio fisso secco
1	69,38	6,17	24,43	0,03	20,14	79,76	0,09
2	71,7	5,5	23,21	0,09	19,11	80,58	0,3
3	69,07	6,27	24,62	0,04	20,26	79,62	0,13
media	70,05	5,98	24,09	0,05	19,84	79,99	0,17
dev. Std	1,17	0,34	0,62	0,03	0,52	0,42	0,09

5. Sperimentazione di sistemi innovativi per la valorizzazione delle biomasse derivanti dalla manutenzione di alvei fluviali

La “sperimentazione di sistemi innovativi per la valorizzazione delle biomasse derivanti dalla manutenzione di alvei fluviali” prevede la caratterizzazione chimico-fisica e la liquefazione della biomassa erbacea, derivante dall’attività di manutenzione ordinaria e straordinaria dei bacini idrografici, al fine di ottenere biopolioli da utilizzare nella sintesi di poliuretani.

In particolare si cercherà di sviluppare un processo di liquefazione della biomassa mediante microonde per la produzione di tali biopolioli. Infatti, per ottenere i polioli, la biomassa sarà sottoposta

ad un processo di liquefazione con riscaldamento a microonde, modificando le condizioni sperimentali: tempo e temperatura di reazione, concentrazione di catalizzatore, rapporto del solvente di liquefazione (miscela PEG/glicerolo) e biomassa/solvente [9-11]. Al variare di queste condizioni sarà possibile ottenere biopolioli con caratteristiche differenti, da poter impiegare per la realizzazione di schiume poliuretaniche con proprietà chimico-fisiche variabili e del tutto simile a quelle ottenute con polioli da fonte fossile [12].

L'impiego delle microonde per il processo di liquefazione, rispetto al riscaldamento tradizionale con bagno ad olio diatermico, riduce il tempo di reazione, diminuendo nel contempo il consumo energetico e la sostenibilità ambientale dell'intero processo.

6. Recupero e valorizzazione energetica delle biomasse derivanti dalla manutenzione degli alvei fluviali mediante tecnologie innovative

Il CRB ha messo a punto un innovativo impianto a biomassa caratterizzato da un gassificatore ed uno scambiatore di calore per il recupero dell'aria calda (Fig. 2). La potenza termica è pari a 1 MW, l'impianto è composto da un serbatoio di stoccaggio cubico, coclee di carico, un gassificatore ed uno scambiatore di calore.

Verranno effettuate nei prossimi mesi prove di accensione e funzionamento dell'impianto a partire da biomassa campionata presso il fosso di Montacalvello; tale biomassa verrà selezionata con il metodo della quartatura e si provvederà alle attività di cui al diagramma Gantt riportato in figura (Fig. 3).

Figura 2. Impianto a biomassa del CRB: visione d'insieme e particolare.



Figura 3. Diagramma di Gantt delle attività.

Attività - Biomassa, Fosso di M.te Calvello (VT)	01-'19	02-'19	03-'19	04-'19	05-'19	06-'19	07-'19	08-'19	09-'19	10-'19	11-'19	12-'19
ricerca bibliografica e normativa tecnica												
campionamento biomassa (foto 1)												
caratterizzazione chimico-fisica biomassa												
pretrattamento con steam explosion (foto 2)												
idrolisi enzimatica e fermentazione												
valutazione ambientale di massima												
coordinamento e supervisione attività												
divulgazione e disseminazione risultati												

References

1. Fondacci, L.; Alvioli, M.; Fiorucci, F. La conoscenza dei pericoli naturali come supporto ai processi decisionali di governo del territorio. *UrbanisticaInformazioni* **2017**, *271*, 68-69.
2. Fondacci, L. Governance e pianificazione strategica in contesti fragili. Presentazione della Conferenza Nazionale La conoscenza tecnico scientifica sui fenomeni naturali calamitosi come supporto alla pianificazione strategica in spazi urbani multirischio, Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Ferrara, 5 Maggio 2017.
3. Ave, G.; Fondacci, L. La definizione delle linee strategiche e delle azioni di piano. *La pianificazione strategica per lo sviluppo dei territori*; Rubettino Editore; Publisher: Presidenza Consiglio dei Ministri, Dipartimento della Funzione Pubblica, 2006, pp. 129-136.
4. Ave, G. La pianificazione strategica partecipata in Italia, Materiali Formez. Ufficio Stampa ed Editoria Formez; Publisher: Presidenza Consiglio dei Ministri, Dipartimento della Funzione Pubblica, 2006.
5. Millennium ecosystem assessment. Ecosystem and human well-being: current state and trend. Findings of the Condition and Trends Working Group, Vol.1, UN, Island Press, Washington, Covelo, London, 2005.
6. Fondacci, L. La trasformazione qualitativa dei gruppi di azione locale- The qualitative transformation of local action groups. *Urbanistica* **2019**, *161*.
7. Fondacci L., Per una definizione del paesaggio e della pianificazione strategica dei territori come beni comuni deliberativi. *Il prossimo paesaggio. Realtà, rappresentazione, progetto*. Ed.: Gangemi, 2018, pp. 351-357.
8. www.regione.lazio.it/prl_ambiente/?vw=contenutidettaglio&id=125.
9. Yamada, T.; Hu, Y.; Ono, H. Condensation reaction of degraded lignocellulose during wood liquefaction in the presence of polyhydric alcohols. *J Adhesion Soc Japan* **2001** *37*, 471–478.
10. Kurimoto, Y.; Doi, S.; Tamura, Y. Species effects on wood-liquefaction in polyhydric alcohols. *Holzforschung* **1999**, *53*, 617-622.
11. Nuchter, M.; Ondruschka, B.; Bonrath, W.; Gum, A. Microwave assisted synthesis-a critical technology overview. *Green Chem.* **2004**, *6*, 128–141.
12. Randall, D.; Lee, S. The Polyurethanes Book. Wiley & Sons Ltd. **2002**, New York (U.S.A.).

XIX Congresso Nazionale CIRIAF

Energia e Sviluppo Sostenibile

The human perspective of green buildings: sample composition for energy saving potential in office buildings

Benedetta Pioppi ^{1,*}, Crisanti Chiara ¹, Cristina Piselli ^{1,2} and Anna Laura Pisello ^{1,2}

¹ CIRIAF - Interuniversity Research Centre, University of Perugia, Via G. Duranti 63, 06125, Perugia, Italy

² Department of Engineering, University of Perugia, Via G. Duranti 67, 06125, Perugia, Italy

³ Full Affiliation, Address

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: anna.pisello@unipg.it

Abstract: In Europe, over 40% of the total energy demand is imputable to the buildings sector. This fact implies several consequences, such as environmental pollution, i.e. increase in CO₂ and greenhouse gases emissions, climate change and related events, e.g. overheating risk and the Urban Heat Island phenomenon, peak in energy demand and increase in energy prices, and human related thresholds, i.e. human comfort and health risks. For all these reasons, in the last decades the politic and the scientific communities have focused their attention on building energy efficiency strategies and planning. Most of them involve the implementation of passive and active cooling physical solutions. On the other hand, this work aims at identifying human-based energy retrofit strategies. To this goal an experimental monitoring campaign and large scale survey are combined to identify the potential benefits achievable through triggering actions. In detail, a survey is submitted to different office building occupants to understand workers' energy attitude/behaviors and to identify possible triggering actions. Therefore, different occupancy scenarios may be modelled are modeled by taking into account the detected bad behaviors and possible aware behaviors in terms of human-building interaction. The case study is an office, events and show-room building located in the center of Milan, in the northern part of Italy. Future investigation would translate these tests into a dynamic simulation model as promising opportunity to reduce building energy demand by only turning human behaviors into aware and efficient actions at with quasi zero cost.

Keywords: Occupant behavior; Energy efficiency in Buildings; Building simulation; Thermal comfort; Eco-feedback.

1. Introduction

In the last decades, research studies have pointed up how occupant behavior is a key parameter influencing building energy deficiency. Especially, high performance buildings, which are predicted to provide a sustainable solution for energy saving, often show lower performance in real operating conditions [1]. Moreover, occupants' tolerance for discomfort is much lower in buildings characterized by advanced technologies and automated control systems [2]. Therefore, in such buildings, the gap between expected and real energy performance can reach extremely high percentages only due to the role of occupants [3]. In a nearly-zero energy building (nZEB) simulation scenario, up to 72% increase and 84% reduction of the total building energy use is obtained by Barthelmes et al. [4] due to the implementation of aware and unaware occupant behavior profiles vs. standard profile rather than 37% increase and 32% reduction in a traditional building. Similarly, Piselli and Pisello [5], showed up to 20% discrepancy in the dynamic energy performance simulation of an office building by only varying the occupants simulation scheme. Ridley et al. [6], indeed, demonstrated that behavioral factors, such as occupant choices in terms of appliance use and winter and summer windows and shading operation, negatively impacted on the energy performance gap of two passive houses in the framework of Post Occupancy Evaluation.

Accordingly, aware and energy-educated occupants are required to have really energy efficient and comfortable buildings [7]. In this view, human-based energy retrofits, i.e. strategies aimed at driving occupants' attitudes towards a more rational use of energy resources, should be implemented in parallel to the more classical physical retrofits [8]. This human-centric strategy involves the education and awareness of the occupant to a sustainable and efficient behavior and have been applied via different approaches. In order to motivate occupants behavior change for reducing energy consumption while improving health and indoor environmental quality (IEQ) conditions, Barthelmes et al. [9] carried out an engagement campaign in a residence hotel by providing combined user-friendly feedback on energy, IEQ, and health. Users were also guided on how to act to save energy while maintaining comfortable conditions. Similarly, Timm e Deal [10] implemented a energy behavior change campaign in college campuses by graphically displaying to the users their real-time energy use on an energy dashboard. On the other hand, occupants' awareness can be trained also by applying learning and gamification approaches, namely humans-in-the-loop integration by creating a building management interface that allows the interaction with users to incentivize energy efficient behavior via a social game [11]. Pal et al. [12] proposed another building energy management outlook based on the communication to the occupants of the reasons together with the recommended energy savings actions. The system generates the recommendations based on physical models, context, and historical monitored data through an approximation-guided evolutionary multi-objective optimization algorithm with the aim to minimize thermal and air quality dissatisfaction, energy consumption, and interference with the users' daily routine. Anyway, the implemented education strategy has to be based on the understanding of occupant's motivation when interacting with the building [13]. In some cases this human based strategy allows even higher effectiveness in terms of cost-benefits analysis. For instance, Barbosa and Azar [14] showed up to 24% achievable energy savings thanks to implementation of simple operation strategies without any capital investment nor influence to the comfort and wellbeing of

building occupants. Focusing on the comparison against acknowledged physical retrofit strategies, Pisello et al. [15] obtained a higher reduction of cooling energy need due to an efficient control of the thermostat by the user than to the implementation of cool roof. In general, Corngati et al. [16] demonstrated the potential for energy efficiency improvement only based on behavioral and lifestyle interventions, which are also promisingly cost effective, compared to technically invasive physical retrofit strategies. In fact, innovative and high performance technologies are sometimes characterized by high environmental impacts and costs, with long payback periods during their life span [17]. On the contrary, acting on the sole human behavior usually provides a cost-free and, therefore, extremely favorable solution, which can be suitably implemented in every building context. In particular, human based energy retrofit are an effective solution to be implemented in existing buildings, especially those with restrictions to high impact physical retrofits, e.g. historical buildings. When it is necessary to preserve as much as possible the architectural evidence historical buildings, energy and economical savings can be achieved by acting on building use and operation [18].

2. Method

Based on the outlined introduction and motivation, the applied methodology involves the following steps:

- Tailored survey submitted to potential occupants of the case study building and in general of office buildings, in order to collect information about personal background, working habits and comfort perception.
- Definition of possible human based energy retrofit scenarios. The scenarios are defined on the basis of the sample distribution analysis; in detail they are highlighted the occupant's bad behaviors in terms of energy use on which to act. Therefore, they are created six scenarios, three of them related to the bad behavior influence and the other related to the set-point changing.

Future developments will include:

- Dynamic simulation and field microclimate monitoring. In order to simulate the defined scenarios, a thermal energy dynamic simulation model of the selected case study is realized. To validate this model, the dynamic simulation is performed under the climate boundary condition of Milano and a field microclimate campaign is conducted by thermos-hygrometers installed with different orientation in the building case study. The results are then compared through calibration indexes.
- Comparative analysis of the scenarios' results in term of energy demand. In detail, the energy requirements are analyzed in terms of energy use during the year. A cost-analysis is also conducted to identify the best human-based energy retrofit strategy which combine high energy performance, human well-being and low-cost implementation. Finally, a comparison between energy reduction due to the photovoltaic implementation and energy saving related to the human based energy retrofit implementation.

The occupancy scenarios and associated schedules are developed on the basis of the survey results. In particular, the following occupants' bad energy behaviours are identified: (i) set of inappropriate thermostat values, (ii) windows opening while the HVAC system is turned on, (iii) leaving the electrical devices or the light turned-on while out of the office. Considering these main outcomes, six occupancy scenarios are developed. In all scenarios the occupancy presence is defined, according to the results of the survey, by selecting the most common working schedule.

The first three scenarios are obtained by varying the whole occupant behaviour, i.e. by distinguishing between aware and unaware occupants. The different scenarios are described in detail as follows and summarized in Table XX.

- Scenario 0 describes occupant behaviour as a result of the survey answers, by including the noticed bad energy behaviours to the limited percentage of occupants that declared that specific behaviour. Therefore, it is considered as the reference scenario.
- Scenario -1 considers that all the occupants assume each of the noticed bad behaviours. Accordingly, it is considered as the pejorative baseline scenario.

Scenario 1, conversely, reproduces an aware behaviour of the occupants about energy waste, except as concerns the thermostat control. This means that the thermostat set-points are kept equal to scenario 0, but all the other bad behaviours related to windows opening and use of electrical devices and lighting are removed. Also, the aware operation of window shadings is included.

The other scenarios are obtained by varying the thermostat control by occupants towards energy efficient use and savings. Moreover, it is hypothesized that all the occupants assume aware behaviours in terms of windows opening/closing, use of lighting and electrical devices, and shading systems operation.

Scenario 2 foresees an improvement in the thermostat set-point. More specifically, six sub-scenarios are developed. The first three keep set-point temperature for cooling equal to scenario 0, while improving the energy efficiency in terms of heating set-point. On the contrary, the remaining three scenarios keep set-point temperature for heating equal to scenario 0, while improving the energy efficiency in terms of cooling set-point.

Scenario 3 is also splitted in three sub-scenarios, which consider an improvement in the efficient control of the heating and cooling thermostat simultaneously.

Scenario 4 combines the most energy efficient thermostat set-points defined for the scenario 3.3 with a trigger action related to the manual control of natural ventilation. In detail, the occupants are assumed to open the window only when the outdoor air temperature is higher or lower than a threshold value in winter or summer, respectively.

3. Case study

The case study is a luxury clothing show-room located in Milan (45°27'07.5" N, 9°12'02.4" E), in the North part of Italy. The building occupies about 2400 m² and it is composed by four floors, where exhibition spaces and management, marketing, communication and administrative activities take place. More in detail, a restaurant/cafeteria, administrative and communication offices and a dedicated shooting space are located at the underground floor; while exhibition spaces are equipped

at the first, second and third floor. Moreover, a roof garden and the main management and marketing offices are situated at the third floor. Furthermore, the roof garden has a dedicated space to accommodate the external units of the HVAC systems. The building presents traditional materials such as masonry consisting of brick and stone covered by cement plaster with insulation panel. All the technical characteristics of the building, described in the Table below, are reproduced by the thermal energy model. Therefore, the calibration indexes values obtained comparing the experimental air temperature data and the simulated air temperature data, are calculated for each floor with respect to the ASHRAE calibration criteria and they are reported in the Table below. According to the scientific body of literature, the thermal energy model can be considered faithful to the reality.

4. Results and Discussion

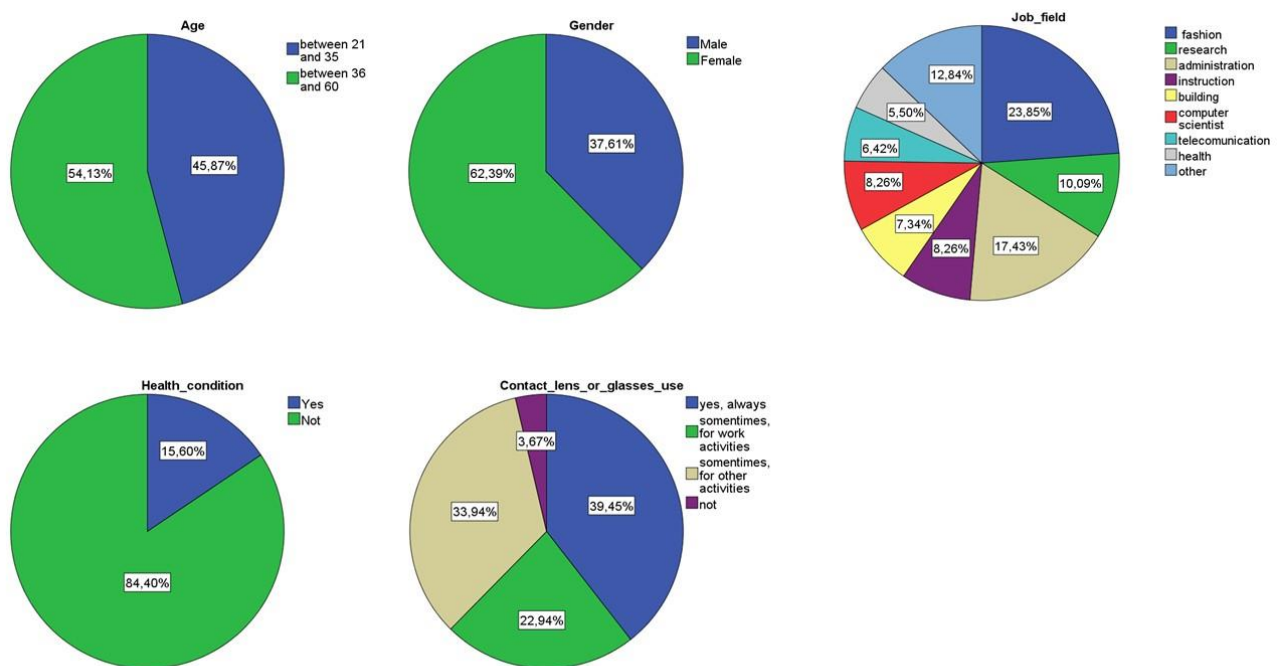
The analysis aimed at assessing the energy saving opportunities achievable through human-based energy saving strategies and their implementation. Therefore, the users' energy behavior was evaluated, matched with users' multi-dimensional comfort perception. Moreover, the economic benefits achievable through human-based strategies implementation were foreseen.

Data collected through the described questionnaire is analyzed in order to sketch the sample composition, to assess the representativeness of the considered population, and understand the participant's energy behaviors. The key findings are then used to identify possible triggering scenarios to be implemented. The following section reports the result of the above mentioned questionnaire taking into account:

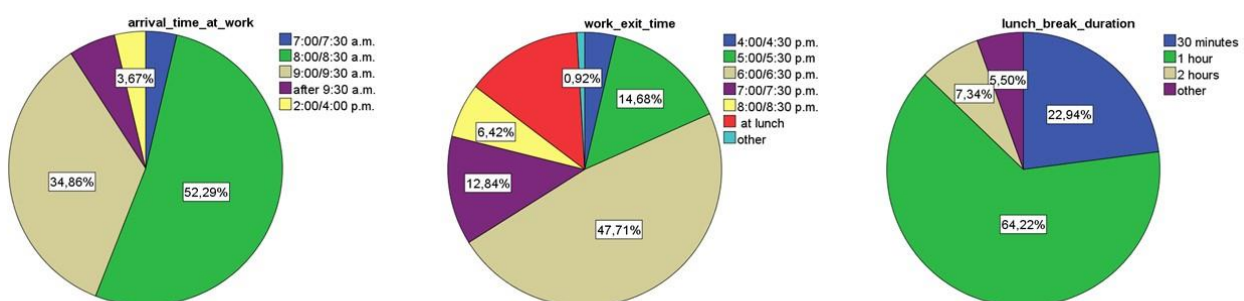
- (i) personal background (i.e. age, gender, education level, etc.);
- (ii) working habits (frequency and daily hours typically spent in office and at home);
- (iii) comfort perception (global and local thermal comfort, illuminance level, indoor air quality).

The sample consists of 100 people reached via web during summer 2018. The number of participants is consistent respect to the variables, therefore the sample size can be considered adequate.

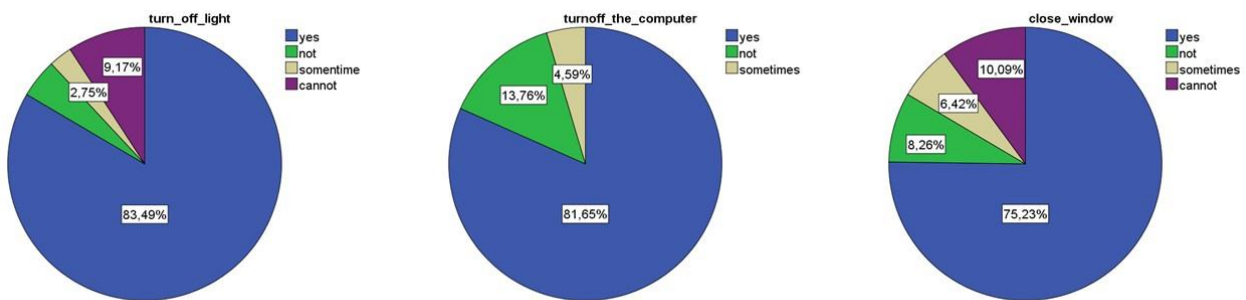
The analysis of the sample distribution shows that most of the participants are 36-60 years old. In terms of gender the sample is (not well balanced) unbalanced because 68% of the participants are women and the remaining 38% are men. This fact is imputable to the work field of the participants. Consistently, as regarding the job information, most of the participants work in fashion and management field, i.e. 24% and 18% respectively, the 10% and 8% work respectively in research and education field and the remaining part work in other field such as construction, sanitary, technology (Figure 1).

Figure 1. Composition of the sample.

Regarding the occupancy presence data, it can be noticed that the 79% of the participants spend most of their daily time in the office. Figure 2 shows that the most of the interviewees typically work five days per week, i.e. Monday to Friday, from around 8.00 a.m. to around 6.00 p.m., with 1 hour of lunch break. Moreover, 47% of the respondents work in open spaces area, while 20% of the respondents work in their own office, the 18% share their office with other people (two desks) and the remaining 18% share their office with other two people (three desks).

Figure 2. Attitude of building occupants surveyed in this study.

The distribution analysis of the data related to energy working behaviors and human comfort perception show that 83% of the office workers usually forget to turn off lighting apparatus before leaving office, as well as 82% of the respondents leaving the PC running. On the other hand, 75% of the office workers usually close the windows before going out, 8% forget to close them, while 7% cannot control the window opening/closing (Figure 3).

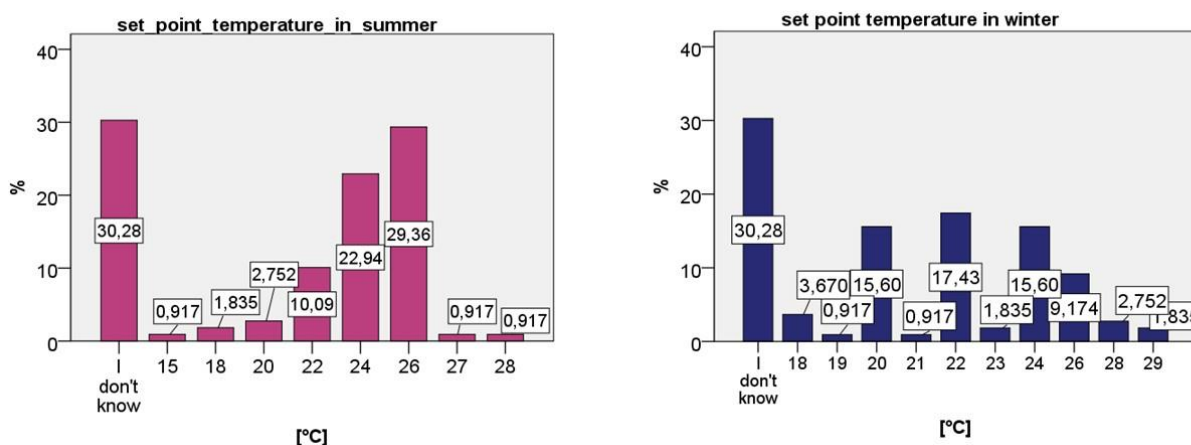
Figure 3. Occupants' attitude in terms of final energy use in their office.

In terms of lighting comfort perception 75% of the respondents are highly satisfied with the level of luminance, just the 11% affirm to need more lighting level of luminance. However, both in winter and in summer, workers prefer natural lighting respect to the artificial one. In detail, in winter 46% of the respondents use natural lighting during the middle part of the day, and this percentage increases up to 67% in summer.

Focus the attention on the HVAC system use, it can be notice that most of the interviewed usually use the heating system in winter, i.e. 95% of the respondents, and the cooling system in summer, 65% respectively. Only 5% and 14% of the interviewed answered that sometimes turn on the heating and cooling system respectively in winter and in summer. Therefore, in winter 78% of the participants affirm to feel themselves thermally comfortable, in summer this percentage fell to 71%, while the other 21% and 4% feel hot and very hot respectively. More in detail, the air temperature set point usually set by the occupants, both in winter and in summer, is deeply investigated in order to define possible strategies able to improve energy efficiency and comfort simultaneously. As previously described most of the scenarios/strategies proposed are obtained changing the air temperature set point.

As it can be seen in Figure 4 the set-point distribution is heterogeneous both in winter and in summer. As matter of fact, in summer, the 10% of the respondents set the air temperature equal to 22°C, while the 22.9% prefer 24°C and the 29.4% of the respondents set the air temperature equal to 26°C. In winter the 17.4% set the air temperature equal to 22°C in winter, the 15.6% prefer 24°C and just the 9.2% prefer 26°C. Moreover, it can be notice that both in winter and in summer the 30.3% of the occupants didn't know the set-point values.

According to the ASHRAE Standard-55-2004, in winter, the acceptable operative temperature ranges between 20°C and 25,5°C, while, in summer, the acceptable operative temperature ranges between 23°C and 25,5°C corresponding to a relative humidity values of 60% and it varies between 24,5°C and 28°C corresponding to a relative humidity values of 30%. Therefore, there are possibility of set-point intervention in order to save energy. Moreover, 60% of the occupants declared that they had the possibility to control the thermostat, while the 13% affirmed that they didn't have this possibility and among of them the 77% affirmed that would like to have the air temperature control. Finally, the remaining 27% didn't know if there are the opportunity to change the air temperature set-point.

Figure 4. Temperature set-point attitudes.

The action related to the thermal discomfort perception are also investigated. Both in winter and in summer. The results obtained in winter show that 69% of the people who didn't feel themselves thermally comfortable interact with the thermostat, the 12% opens the windows, while the 6% opens the door. On the other hand, in summer, 49% of the interviewed interact with the thermostat, the 15% opens the windows and the 9% opens the door. Moreover, it can be notice that 27% of the respondents simultaneously use the cooling system and open the windows, which means a huge waste of energy.

5. Acknowledgements

The authors thank COMMEET project supported by Valeri Elettrica s.r.l. aimed at identifying energy saving opportunities by means of human behavior in a retrofitted building.

References

1. Hong, T.; Yan, D.; D'Oca, S.; Chen, C. Ten questions concerning occupant behavior in buildings: The big picture. *Build. Environ.* **2017**, *114*, 518–530, doi:10.1016/j.buildenv.2016.12.006.
2. Day, J. K.; O'Brien, W. Oh behave! Survey stories and lessons learned from building occupants in high-performance buildings. *Energy Res. Soc. Sci.* **2017**, *31*, 11–20, doi:10.1016/J.ERSS.2017.05.037.
3. Liang, J.; Qiu, Y.; Hu, M. Mind the energy performance gap: Evidence from green commercial buildings. *Resour. Conserv. Recycl.* **2019**, *141*, 364–377, doi:10.1016/j.resconrec.2018.10.021.
4. Barthelmes, V. M.; Becchio, C.; Fabi, V.; Corgnati, S. P. Occupant behaviour lifestyles and effects on building energy use: Investigation on high and low performing building features. *Energy Procedia* **2017**, *140*, 93–101, doi:10.1016/J.EGYPRO.2017.11.126.
5. Piselli, C.; Pisello, A. L. Occupant behavior long-term continuous monitoring integrated to prediction models: Impact on office building energy performance. *Energy* **2019**, *176*, 667–681, doi:10.1016/J.ENERGY.2019.04.005.
6. Ridley, I.; Bere, J.; Clarke, A.; Schwartz, Y.; Farr, A. The side by side in use monitored performance of two passive and low carbon Welsh houses. *Energy Build.* **2014**, *82*, 13–26,

doi:10.1016/j.enbuild.2014.06.038.

7. Alam, M. M.; Bao, H.; Zou, P. X. W.; Sanjayan, J. Behavior Change of Building Users and Energy Consumption. In *Encyclopedia of Sustainable Technologies*; Elsevier, 2017; pp. 189–196 ISBN 9780128046777.
8. Pisello, A. L.; Asdrubali, F. Human-based energy retrofits in residential buildings: A cost-effective alternative to traditional physical strategies. *Appl. Energy* **2014**, *133*, 224–235, doi:10.1016/J.APENERGY.2014.07.049.
9. Barthelmes, V.; Fabi, V.; Corgnati, S.; Serra, V. Human Factor and Energy Efficiency in Buildings: Motivating End-Users Behavioural Change. In; Springer, Cham, 2019; pp. 514–525.
10. Timm, S. N.; Deal, B. M. Effective or ephemeral? The role of energy information dashboards in changing occupant energy behaviors. *Energy Res. Soc. Sci.* **2016**, *19*, 11–20, doi:10.1016/J.ERSS.2016.04.020.
11. Konstantakopoulos, I. C.; Barkan, A. R.; He, S.; Veeravalli, T.; Liu, H.; Spanos, C. A deep learning and gamification approach to improving human-building interaction and energy efficiency in smart infrastructure. *Appl. Energy* **2019**, *237*, 810–821, doi:10.1016/j.apenergy.2018.12.065.
12. Pal, M.; Alyafi, A. A.; Ploix, S.; Reignier, P.; Bandyopadhyay, S. Unmasking the causal relationships latent in the interplay between occupant's actions and indoor ambience: A building energy management outlook. *Appl. Energy* **2019**, *238*, 1452–1470, doi:10.1016/J.APENERGY.2019.01.118.
13. Von Grabe, J. How do occupants decide their interactions with the building? from qualitative data to a psychological framework of human-building-interaction. *Energy Res. Soc. Sci.* **2016**, *14*, 46–60, doi:10.1016/j.erss.2016.01.002.
14. Barbosa, J. D.; Azar, E. Modeling and implementing human-based energy retrofits in a green building in desert climate. *Energy Build.* **2018**, *173*, 71–80, doi:10.1016/J.ENBUILD.2018.05.024.
15. Pisello, A. L.; Piselli, C.; Cotana, F. Influence of human behavior on cool roof effect for summer cooling. *Build. Environ.* **2015**, *88*, doi:10.1016/j.buildenv.2014.09.025.
16. Corgnati, S. P.; Cotana, F.; D'Oca, S.; Pisello, A. L.; Rosso, F. *A Cost-Effective Human-Based Energy-Retrofitting Approach*; 2017; ISBN 9780081011287.
17. Tulus, V.; Abokersh, M. H.; Cabeza, L. F.; Vallès, M.; Jiménez, L.; Boer, D. Economic and environmental potential for solar assisted central heating plants in the EU residential sector: Contribution to the 2030 climate and energy EU agenda. *Appl. Energy* **2019**, *236*, 318–339, doi:10.1016/j.apenergy.2018.11.094.
18. Spigliantini, G.; Fabi, V.; Schweiker, M.; Corgnati, S. Historical buildings' energy conservation potentialities: A methodology focused on building operation. *Int. J. Build. Pathol. Adapt.* **2018**, doi:10.1108/IJBPA-12-2017-0062.

XIX Congresso Nazionale CIRIAF

Energia e Sviluppo Sostenibile

Esempio di BIM applicato ad un edificio storico ad elevate prestazioni energetiche

Jessica Romanelli ¹, Matteo di Grazia ¹, Augusto Gavagni ¹, Francesco Strangis ¹, Anna Laura Pisello^{1,2,*} and Franco Cotana^{1,2}

¹ CIRIAF - Interuniversity Research Centre, University of Perugia, Via G. Duranti 63, 06125, Perugia, Italy

² Department of Engineering, University of Perugia, Via G. Duranti 67, 06125, Perugia, Italy

* Anna Laura Pisello. E-mail: anna.pisello@unipg.it

Abstract: L'efficientamento energetico e la rifunionalizzazione di edifici esistenti e storici è diventata una necessità urgente nel settore della fisica dell'edificio e della progettazione architettonico-energetica in generale, data l'enorme mole di ambiente costruito a disposizione e la necessità di riduzione dei consumi energetici ad esso associati. In Italia questa necessità è resa ancor più urgente dalla qualità architettonica e dal pregio che necessariamente, in qualità anche di identificatori sociali, devono essere preservati. In quest'ambito, anche gli edifici storici devono adeguarsi alle metodologie di progettazione moderne e funzionali ed anzi trarne vantaggio in termini di potenzialità. Questo lavoro vuole fornire uno spunto operativo alla redazione di modelli BIM per edifici storici in cui la simulazione energetica svolge un ruolo chiave nella progettazione dell'intervento, anche grazie alla possibilità di rappresentare adeguatamente, in ambiente di simulazione, tecnologie innovative ed impianti alimentati da fonti energetiche rinnovabili, in un'ottica di hBIM e geo-hBIM.

Keywords: Efficienza energetica; Simulazione dinamica; BIM; hBIM; Edifici storici; Riqualificazione.

1. Premessa

La modellazione termoenergetica in regime dinamico costituisce un riferimento di calcolo consolidato dal punto di vista scientifico con importanti potenzialità di sviluppo ed implementazione anche sul campo professionale, anche grazie agli ultimi sviluppi normativi sia a livello internazionale che nazionale[1]. In quest'ambito, la caratterizzazione di nuovi edifici risulta più semplice tecnicamente

anche per la maggiore e migliore qualità di dati ed informazioni a disposizione utili per la costruzione di modelli attendibili con solutori affidabili già sul mercato[2]. L'utilizzo di metodologie di questo tipo su edifici storici in fase di riqualificazione rende la procedura più complessa ed è quindi necessaria l'interazione – o meglio l'interoperatività – delle varie professionalità che interagiscono con la fase di diagnosi, progettazione, realizzazione e monitoraggio[3]. Questo lavoro vuole quindi presentare dal punto di vista operativo e procedurale le fasi di modellazione energetica nella piattaforma BIM che, per gli edifici storici subisce delle specifiche variazioni, tanto da definirne un riferimento specifico che va sotto il nome h-BIM, dove appunto per “h” si intende *historical building*[4] [5].

Vengono quindi presentati i dettagli del caso di studio e le procedure iniziali di modellazione architettonica ed energetica delle Ex-Scuderie della Rocca Benedettina di Sant'Apollinare, primo edificio certificato con il protocollo Green Building Council HB (Historic Building) attualmente in fase di studio[6][7].

2. L'edificio caso di studio: Ex Scuderia Sant'Apollinare

L'Ex-Scuderia della Rocca di Sant'Apollinare è stata individuata come sito “demo” nell'ambito del progetto europeo di ricerca GEOFIT (Horizon 2020) di cui UNIPG è partner.

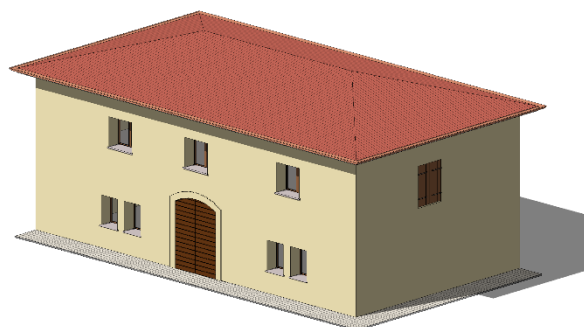
Il progetto di ricerca prevede l'efficientamento energetico di edifici storici attraverso riqualificazioni con impianto geotermico ad elevata efficienza. L'avanzamento tecnologico principale previsto dal progetto è relativo alla particolare configurazione degli scambiatori a terra, denominati “earth basket”, ed alla soluzione adottata per la pompa di calore. I primi, tramite configurazione geometrica di tipo elicoidale, permettono il raggiungimento di elevate prestazioni di scambio termico con il terreno, evitando il drilling in profondità inadatto ad interventi nei centri storici. Ancora, la pompa di calore ibrida del tipo acqua-acqua, unisce un ciclo a compressione di vapore saturi ad un ciclo ad adsorbimento aumentando il coefficiente di prestazione per minore consumo elettrico del compressore.

Vista la necessità di disporre nell'ambito del progetto di un modello termo-energetico dettagliato dell'edificio, si è provveduto a costruirne il modello BIM con l'obiettivo di realizzare un “as-built” architettonico che potesse facilitare la trasformazione in modello geometrico per il motore di calcolo energetico e contemporaneamente potesse facilitare la gestione operativa del bene in comodato da parte del CIRIAF-CRB, come palestra sperimentale utile alla didattica e ai progetti di ricerca.

Le potenzialità connesse allo sviluppo e al progressivo maggior livello di dettaglio raggiungibile dal modello BIM congruentemente agli usi e agli obiettivi dello stesso sono ancora in fase sperimentale. Un'importante opportunità è sicuramente l'interazione e l'integrazione tra l'area del facility management della struttura e il sistema di gestione impiantistico e di sicurezza.

2.1 Building Information Model (BIM)

La piattaforma di design authoring utilizzata per la progettazione del modello informativo è Revit (Autodesk), attraverso la quale si è eseguita la modellazione dell'edificio e la costruzione dei vani tecnici e delle zone termiche con relativo abaco (Figura 1).

Figura 1. Immagine del modello BIM.

Non richiedendo un LOD (Level Of Development) particolarmente avanzato per gli elementi architettonici, poiché l'obiettivo principale del modello informativo era la costruzione del modello geometrico di simulazione energetica, è stato possibile ridurre i tempi che la costruzione di famiglie parametriche per solai e tetto avrebbe richiesto. Questa semplificazione non va a discapito della completezza del modello potendolo integrare con contenuti informativi di tipo CAD, quali ad esempio particolari costruttivi degli elementi tecnologici.

L'edificio è composto da due piani fuori terra e un piano seminterrato. Il piano seminterrato viene utilizzato come laboratorio per le analisi di campioni di biogas prodotto dal biodigestore, mentre i piani superiori sono destinati ad uffici.

La struttura è stata divisa in 17 zone termiche, riportate nell'abaco di Tabella 1, con 3 vani non riscaldati. I vani non riscaldati sono il vano tecnico per l'impianto di riscaldamento e acqua calda sanitaria (piano seminterrato), il vano tecnico per l'impianto elettrico e di automazione (piano seminterrato) e il vano scale. La superficie utile è di circa 200 m² per un volume riscaldato pari a 700 m³. Un esempio della vista dei confini e della ripartizione in zone termiche è riportato in Figura 2 con differenti colorazioni come da piattaforma di design authoring.

3. La costruzione del Building Energy Model (BEM)

Il passaggio dal modello BIM al modello di simulazione energetica è stato eseguito tramite formato di scambio dati gbXML (Green Building XML); formato che nasce per aumentare l'interoperabilità tra le diverse piattaforme di design authoring e software di calcolo energetico. La trasformazione nel modello di simulazione energetica non è propriamente indolore e richiede semplificazioni al modello architettonico giustificate dal processo di calcolo nel motore di simulazione, come per esempio il matching delle superfici di vani riscaldati adiacenti. Le superfici esportate corrispondono alle superfici dei vani e delle zone termiche assegnate all'interno del modello BIM e sono delle superfici analitiche, non parametriche e di spessore infinitesimale alle quali andranno poi associate le relative proprietà termiche. L'interoperabilità e lo scambio dati con questo formato è dunque relativa alla sola componente geometrica, trascurando di fatto tutti i dati delle proprietà termiche inserite nel pacchetto d'involucro murario modellato in Revit, perciò si rende necessaria una duplicazione del lavoro eseguito nel modello BIM. Un'alternativa a tale procedimento è il trasferimento dei dati attraverso IFC (Industry Foundation Class) attualmente alla versione IFC 4.

Il motore di calcolo utilizzato per lo studio delle performance energetiche dell'edificio è EnergyPlus, sviluppato dal Dipartimento dell'Energia USA. EnergyPlus lavora con file di testo sia in ingresso che in uscita e la sua unica interfaccia grafica è l'IDF Editor, il quale permette la costruzione e la modifica degli oggetti presenti nel modello. Attraverso un plugin in SketchUp è possibile esportare le coordinate dei vari vertici delle superfici in EnergyPlus e disporre così a tutti gli effetti del modello geometrico con le zone termiche definite precedentemente all'interno del formato di scambio. All'interno di EnergyPlus i vari strati componenti il pacchetto d'involucro vengono modellati come layer aggregati. Per i materiali costituenti le superfici opache le principali proprietà termofisiche, riportate in Tabella 2, sono la conducibilità termica, spessore, densità e calore specifico.

Mentre per i materiali delle superfici trasparenti le principali proprietà termofisiche inserite sono lo spessore, la trasmittanza e riflettanza alla radiazione solare, emissività e conducibilità termica, oltre a valori come la trasmittanza nel visibile, utile al calcolo del fattore di luce diurna. Come si può vedere dalla Tabella 3, i vetri sostituiti durante la riqualificazione energetica dell'edificio sono di tipo basso emissivo, inoltre il materiale di riempimento dell'intercapedine è costituito da Argon, con le relative proprietà presenti direttamente nel motore di calcolo.

4. La costruzione del sistema impiantistico nell'ambiente di simulazione

L'impianto di trigenerazione a servizio della Rocca di Sant'Apollinare è stato dimensionato sulla base della richiesta energetica complessiva di tutti gli edifici e utilizzarlo al di fuori delle condizioni di progetto risulterebbe in prestazioni molto inferiori. A tal proposito è stato in seguito indispensabile realizzare un impianto di back-up autonomo per rendere fruibile la parte delle Ex Scuderie della Rocca, i cui lavori erano stati ultimati.

In tal modo l'impianto di trigenerazione è stato sostituito provvisoriamente da una caldaia a condensazione da 24 kW. L'impianto di generazione, distribuzione e emissione è rappresentato nella figura seguente.

L'aria di rinnovo e la sua climatizzazione sono effettuate da un'unità di trattamento aria a portata costante con bocchette di immissione negli uffici del primo e secondo piano e ripresa effettuata dai bagni. Nell'UTA è presente una batteria di riscaldamento ad acqua per condizionare l'aria miscelata con i rinnovi necessari e un recuperatore di calore a flussi incrociati, ma il carico termico dell'edificio nel periodo di riscaldamento è prevalentemente soddisfatto dal pavimento radiante presente in tutti i vani, eccetto i bagni dove si è preferito installare dei radiatori a parete.

La distribuzione ai vari terminali di emissione è effettuata da un volano di accumulo di 500 litri mantenuto alla temperatura di setpoint tramite scambiatore a piastre tra caldaia e volano stesso.

Per l'acqua calda sanitaria è stato realizzato un accumulo di 1000 litri isolato termicamente.

L'intero impianto è stato modellato attraverso circuiti d'aria (*AirLoop*) e circuiti d'acqua (*PlantLoop*). EnergyPlus richiede che ogni circuito sia diviso in due parti: una di richiesta (*DemandSide*) e l'altra di fornitura (*SupplySide*) termica.

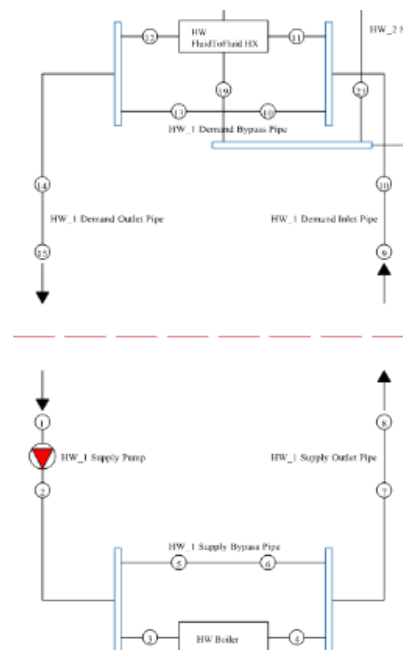
Il solo impianto ad acqua ha richiesto l'immissione di 90 oggetti, equivalenti ai componenti impiantistici, e tre circuiti incrociati.

L'impianto è stato diviso in tre circuiti ad acqua così disposti:

1. HW 1 Loop: schematizza la parte di generazione dell'impianto con la caldaia a condensazione lato fornitura e lo scambiatore a piastre lato domanda (Figura 2).
2. HW 2 Loop: modello dell'anello ad acqua intermedio tra generazione e distribuzione, dove lo scambiatore a piastre fornisce il calore necessario a riscaldare fino alla temperatura di setpoint l'acqua presente nel volano termico da 500 litri.
3. HW 3 Loop: rappresenta la parte terminale dell'impianto compresa l'emissione, all'accumulo ai vari terminali (radiatori, pavimenti radianti, batteria di riscaldamento).

L'attivazione e il profilo di funzionamento settimanale dell'impianto è stato descritto tramite apposite schedules, simili alle stesse utilizzate per definire i profili di occupazione, l'attività metabolica degli occupanti, l'apporto termico delle luci e degli apparecchi elettronici presenti all'interno delle zone termiche.

Figura 2. HW 1 Loop: schema dell'impianto con la caldaia a condensazione lato fornitura e lo scambiatore



La temperatura di setpoint per il fluido termovettore dell'impianto è stata impostata pari a 68°C, temperatura richiesta dalla batteria di riscaldamento dell'UTA e dai radiatori a parete. Per quanto riguarda il pavimento radiante la temperatura di setpoint è di 38 °C, perciò è inserito nel circuito un bypass che emula il funzionamento delle valvole di miscelazione.

Il circuito è dimensionato sulla base della richiesta termica relativa ai terminali di zona e dalle richieste di aria di rinnovo, modellate sempre tramite apposita schedulazione. L'aria di rinnovo ed aria espulsa incrociano i loro flussi all'interno dello scambiatore di calore, permettendo di recuperare in tal modo parte del calore sensibile in uscita. Il ventilatore centrifugo posto come ultimo componente in mandata dell'UTA dirige il flusso alle bocchette di aereazione presenti nei locali mentre la ripresa viene effettuata dai bagni. La possibilità di avere mandata e ripresa in ambienti diversi non è considerata dal

motore di calcolo, che permette esclusivamente l'immissione e il recupero dallo stesso locale. Per tenere in conto del fenomeno di trasporto dell'energia termica per sovrappressione nei locali come futuro sviluppo di modello si prevede di utilizzare

5. Considerazioni conclusive

L'esempio di modellazione mostrato vuole servire da guida operativa di procedura per la simulazione energetica da associare alle altre piattaforme di scampi e di condivisione delle informazioni di carattere tecnica-progettuale in fase di retrofit di un edificio storico oggetto di studio. Le difficoltà riscontrate nella modellazione riguardano soprattutto la rappresentazione dei particolari architettonici e della loro qualificazione, e lo scambio delle informazioni fra il modellatore dell'edificio e di quanto invece interagisce con le scelte impiantistiche. Futuri sviluppi e maggiori dettagli riguarderanno l'integrazione impiantistica con l'ulteriore definizione di sistemi geotermici innovativi, includendo ciò che viene definito geoBIM, che riguarderà appunto anche lo studio del terreno.

Bibliografia

1. Allesina, G.; Mussatti, E.; Ferrari, F.; Muscio, A. A calibration methodology for building dynamic models based on data collected through survey and billings. *Energy Build.* **2018**, *158*, 406–416, doi:10.1016/j.enbuild.2017.09.089.
2. Oller, P. E.; Alonso Rodríguez, J. M.; González, Á. S.; Fariña, E. A.; Álvarez, E. G. Improving the calibration of building simulation with interpolated weather datasets. *Renew. Energy* **2018**, *122*, 608–618, doi:10.1016/j.renene.2018.01.100.
3. Castaldo, V. L.; Pisello, A. L. Uses of dynamic simulation to predict thermal-energy performance of buildings and districts: A review. *Wiley Interdiscip. Rev. Energy Environ.* **2017**, doi:10.1002/wene.269.
4. Pisello, A. L.; Petrozzi, A.; Castaldo, V. L.; Cotana, F. Energy refurbishment of historical buildings with public function: Pilot case study. In *Energy Procedia*; 2014; Vol. 61.
5. Pisello, A. L.; Petrozzi, A.; Castaldo, V. L.; Cotana, F. On an innovative integrated technique for energy refurbishment of historical buildings: Thermal-energy, economic and environmental analysis of a case study. *Appl. Energy* **2014**, *162*, doi:10.1016/j.apenergy.2015.05.061.
6. Castaldo, V. L.; Pisello, A. L.; Boarin, P.; Petrozzi, A.; Cotana, F. The experience of international sustainability protocols for retrofitting historical buildings in Italy. *Buildings* **2017**, *7*, doi:10.3390/buildings7020052.
7. Pisello, A. L. Thermal-energy analysis of roof cool clay tiles for application in historic buildings and cities. *Sustain. Cities Soc.* **2015**, *19*, doi:10.1016/j.scs.2015.03.003.

XIX Congresso Nazionale CIRIAF

Energia e Sviluppo Sostenibile

DATA DRIVEN DESIGN PER L'ARCHITETTURA IN LEGNO.

Ricerche rappresentative di algoritmi evolutivi per l'ottimizzazione delle soluzioni multi-obiettivo

Fabio Bianconi ^{1,*}, Marco Filippucci ¹, Giulia Pelliccia ¹ and Alessandro Buffi ¹

¹ Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Perugia, Via G. Duranti 93, 06125 Perugia, Italy

* Autore di riferimento. E-Mail: fabio.bianconi@unipg.it

Abstract: Sempre più oggi l'architettura è chiamata a rispondere a criteri prestazionali, che ne condizionano la forma e le tecniche per la sua realizzazione. Se le logiche del mercato sono un fattore determinante della questione, parimenti, in virtù del medesimo principio, il miglioramento dell'efficienza energetica è un obiettivo sempre più centrale nella progettazione contemporanea. In virtù della Direttiva Europea EPBD del 2010 (2010/31/UE) per cui già ora tutti gli edifici pubblici di nuova costruzione dovranno essere a energia quasi zero e i restanti dal 31 dicembre 2020, si palesa l'imminente necessità di sperimentare nuovi sistemi e strumenti per l'incremento delle prestazioni energetiche degli edifici, obiettivo che si lega strettamente alla volontà di adottare materiali e processi costruttivi il più possibile ecosostenibili.

In tale contesto si inserisce la ricerca svolta all'interno della rappresentazione digitale del disegno dell'architettura. In particolare, assume un ruolo determinante, oltre alle strutture, l'analisi energetica dell'edificio progettato, che entra in campo con una varietà di parametri che definiscono le proprietà dei flussi termici e dei materiali, il rendimento dei sistemi impiantistici, il comportamento degli abitanti ecc. Le prestazioni richieste sono così interconnesse ai numerosi parametri che non è possibile, per il progettista, valutare tutte le molteplici combinazioni. La capacità computazionale è invece il grande punto di forza degli attuali strumenti digitali, chiamati a trovare, nell'approccio di *form-finding*, le migliori combinazioni, ricercando soluzioni ottimali anche in funzione di più obiettivi.

All'interno di una più ampia ricerca sulle strutture in legno nel campo della rappresentazione digitale, la presente ricerca vuole attuare un processo di ottimizzazione volto a selezionare le migliori stratigrafie in funzione dei materiali e degli spessori che le compongono, massimizzando il risparmio energetico e minimizzandone il costo. Lo studio riguarda pareti perimetrali e coperture, analizzate dal punto di vista del comportamento

invernale ed estivo, con particolare attenzione al rischio di formazione di condensa interstiziale. Variando in maniera parametrica i diversi materiali e spessori che compongono la stratigrafia in esame, attraverso gli algoritmi evolutivi è possibile ottenere un numero finito di soluzioni che contemporaneamente presentano i migliori valori dei parametri indicati. Il risultato è un abaco di soluzioni che presentano ottime caratteristiche invernali (trasmittanza) ed estive (sfasamento e fattore di attenuazione), che abbiano costi contenuti e non presentino condensa interstiziale, ottenute grazie alla combinazione dei parametri iniziali.

Keywords: ottimizzazione energetica; strutture in legno; data driven design; disegno parametrico; big data.

1. Introduzione

L'attenzione verso la riduzione dei consumi energetici si è manifestata a livello europeo con l'emanazione di specifici indirizzi che rivoluzionano il concetto di sostenibilità energetica, come la Direttiva EPBD [1].

Allo stesso modo, l'Italia ha recepito tali normative attuandole con specifiche leggi e decreti: ad esempio, il Piano d'Azione Nazionale per incrementare gli edifici ad energia quasi zero (PANZEB), pubblicato l'11 agosto 2017 con il Dm Sviluppo economico 19 giugno 2017 (DM 19/06/2017), stimando i costi sia per trasformare in nZEB un edificio esistente, sia per realizzarne uno nuovo. Inoltre, entro il 2021, tutti gli edifici nuovi o soggetti a una ristrutturazione importante di primo livello dovranno essere a fabbisogno di energia quasi zero, mentre per i nuovi edifici pubblici, comprese le scuole, la scadenza è anticipata al 2019.

L'applicazione di tali norme farà sì che nei prossimi anni si assista ad un radicale cambiamento del ruolo dell'edilizia, che vedrà un aumento considerevole degli edifici a zero energy buildings [2, 3]. Si rende quindi necessario l'incremento di risorse, sia in termine di investimenti che di capitale umano, che siano in grado di sviluppare tecnologie in linea con la nuova concezione di sostenibilità ambientale.

In questo contesto si inserisce inoltre la sempre maggiore diffusione delle costruzioni in legno, caratterizzate da una bassa impronta ecologica, che si lega da una parte alla gestione sostenibile del patrimonio forestale italiano, dall'altra alla sensibilizzazione di progettisti e imprese profondamente legate alle costruzioni in calcestruzzo armato [4, 5]. Negli ultimi anni la ricerca italiana ha ottenuto importanti risultati in questo settore attualmente molto attivo a livello internazionale, così, nell'ottica di una graduale decarbonizzazione Europea è auspicabile che ulteriori sforzi di ricerca siano destinati allo sviluppo della filiera del legno italiana. Tali filiere producono materiali ecosostenibili controllati dalla produzione allo smaltimento, ottenuti tramite processi produttivi energeticamente efficienti con ridotte emissioni inquinanti e caratterizzati da una lunga durata e dall'elevata riciclabilità al momento dello smaltimento [6].

Grazie alla prefabbricazione degli elementi strutturali e all'ottimizzazione delle fasi realizzative in cantiere, le strutture in legno si contraddistinguono per l'elevata velocità di realizzazione, rispetto a

quelle tradizionali. Gli elementi strutturali vengono realizzati in fabbrica con macchine a controllo numerico che garantiscono un'estrema precisione e conformità al progetto esecutivo, arrivando ad annullare il rischio di errore ed evitando sprechi di materiale. Il successivo assemblaggio viene effettuato rapidamente, grazie all'ottimizzazione delle tempistiche e del coordinamento in cantiere. Le strutture in Platform-Frame e XLam sono, inoltre, adattabili alle varie esigenze architettoniche e lasciano quindi piena libertà compositiva al progettista.

I recenti sviluppi nel campo del disegno computazionale (computational design) e della fabbricazione digitale introducono una nuova prospettiva per l'architettura in legno. Concetti come Fabbricazione Intelligente [7], Prototipazione Virtuale [8] e Disegno Automatico [9] stanno rapidamente modificando le relazioni tra architettura e produzione industriale permettendo al progettista di ripensarle radicalmente. La capacità di automatizzare sia il processo progettuale che di fabbricazione attraverso gli algoritmi e la possibilità di gestire un eterogeneo insieme di informazioni per ottimizzare questo processo mette in luce il potenziale offerto all'industria delle costruzioni dalle tecnologie informatiche specialmente nel contesto emergente dell'industria 4.0 [10].

L'industria 4.0 scaturisce dalla quarta rivoluzione industriale, quel processo che porterà ad una produzione industriale del tutto automatizzata e interconnessa [11]. Tale approccio investe pienamente il mondo delle costruzioni, che attraverso il digitale tende a connettere in un unico processo il progetto, la realizzazione e la successiva gestione dei prodotti architettonici e infrastrutturali. Questa rivoluzione digitale interessa in primo luogo l'utilizzo dei dati, la potenza di calcolo e la connettività, e si declina in big data, open data, Internet of Things e cloud computing. Attraverso queste innovazioni l'industria delle costruzioni può drasticamente aumentare la sua efficienza. In particolare, nel campo delle costruzioni in legno, caratterizzato da una forte componente di innovazione per quello che concerne l'automazione e la fabbricazione digitale, è riscontrabile uno scarso grado di collaborazione tra progettisti e produttori. In questo modo, solitamente, il processo di ottimizzazione ha inizio solo quando il progetto è stato definito, e i caratteri principali di un edificio sono stati definiti. Al contrario, nelle prime fasi progettuali l'uso di informazioni legate al costo di costruzione e alla gestione energetica possono guidare il processo decisionale portando a considerevoli risparmi in un processo che possiamo chiamare Data Driven Design, progetto guidato da dati o anche Performance Driven Design, progetto guidato dalle prestazioni.

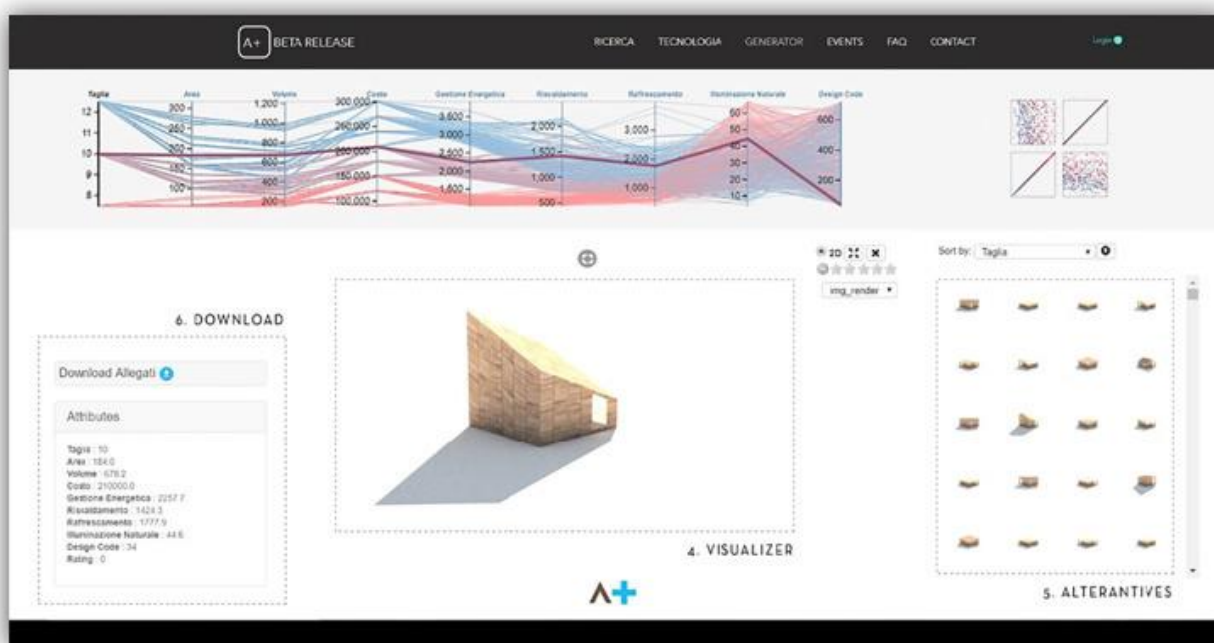
Questa innovazione tecnologica nell'industria delle costruzioni trova il suo fulcro nel processo di rappresentazione e simulazione offerto dai nuovi strumenti BIM e dal Computational Design. La grande quantità di informazioni elaborate da questi strumenti può essere ottimizzata attraverso l'utilizzo di algoritmi genetici (GA) per progettare organismi architettonici in grado di adattarsi a diversi contesti. Tali strumenti, sviluppati primordialmente nel settore dell'Intelligenza Artificiale, sono utilizzati sin dai primi anni Settanta nel campo dell'ingegneria aerea e spaziale e meccanica per lo sviluppo di modelli virtuali o di virtual prototyping. Tuttavia, è solo negli ultimi anni che il loro impiego nell'ottimizzazione strutturale ed energetica ne ha dimostrato la versatilità ed efficacia nel campo delle costruzioni confermando i successi già ottenuti in campi così diversi come: Ingegneria, Arte, Biologia, Economia, Mercato, Genetica, Robotica, Scienze Sociali, Fisica e Chimica.

2. Materiali e metodi

2.1. Background

All'interno di un più ampio programma di ricerca sviluppato dal Laboratorio di Disegno Automatico dell'Università di Perugia nel campo del disegno generativo e del Digital Wood Design [12], il progetto presentato in questo documento è il risultato di un accordo di ricerca con la start-up italiana Abitare+ che si occupa di costruzioni in legno. Come strategia di innovazione, l'azienda era interessata ad arricchire la sua proposta di personalizzazione attraverso tecnologie all'avanguardia come la progettazione parametrica e la fabbricazione digitale. In questo senso, la ricerca propone un processo di progettazione e produzione integrato basato sulla personalizzazione di massa, rivolto principalmente a tecnici e specialisti nel settore della costruzione del legno ma anche utile come strumento di diffusione per studenti e ricercatori. In particolare, nel contesto della personalizzazione di massa introdotto dall'industria 4.0, la ricerca approfondisce la possibilità di utilizzare modelli generativi e principi evolutivi per informare il processo di progettazione e personalizzazione. A questo scopo è stata realizzata un'interfaccia utente online¹ utile nelle prime fasi della progettazione (Fig.1).

Fig. 1: Interfaccia Utente realizzata con Design Explorer per Abitare+.



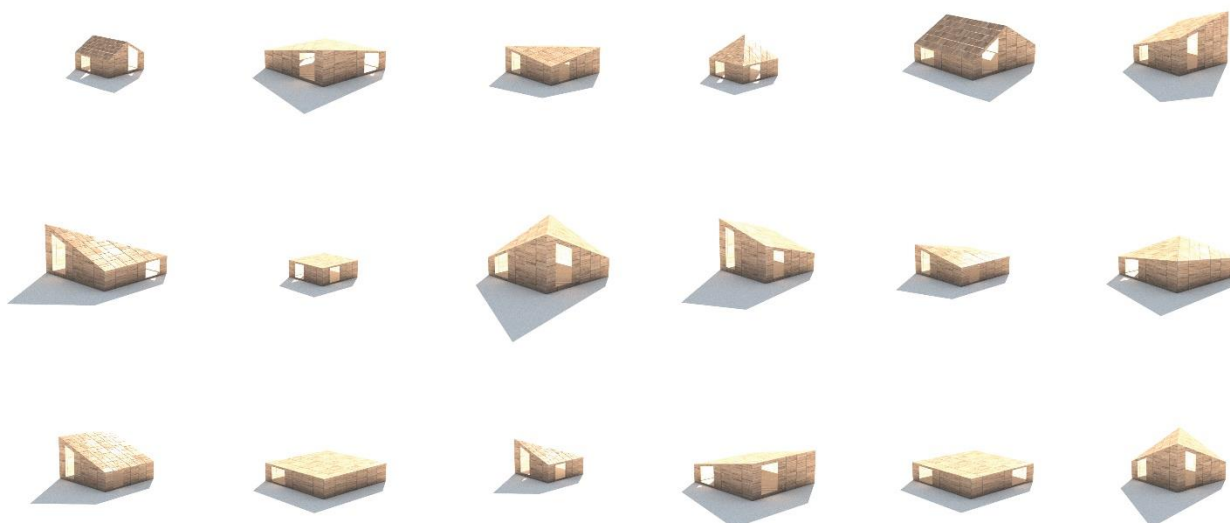
Lo sviluppo di questa ricerca emerge da un processo che combina ricerca, analisi e sperimentazione sulle tecniche della rappresentazione e la tecnologia del legno. La ricerca propone un passaggio da un approccio progettuale in cui l'analisi viene eseguita a valle del processo creativo a uno in cui l'analisi informa e diventa parte integrante del processo creativo. All'interno di un processo più ampio che comprende progettazione, produzione e costruzione, il metodo sviluppato in questa ricerca mira a

¹ <https://www.algoritmi.abitarepiu.com/>

fornire un collegamento tra i team di progettazione e le moderne società di costruzioni basate sulla produzione intelligente. L'idea è che l'azienda, condividendo i dati a propria disposizione, possa aiutare il processo di progettazione fornendo potenti sistemi di supporto decisionale utili sia ai clienti che all'azienda. In particolare, la ricerca presenta i risultati ottenuti dallo studio dei pacchetti costruttivi a disposizione dell'azienda e si inserisce all'interno di un progetto di ricerca integrato che mira ad ottimizzare l'organismo architettonico nel suo complesso attraverso l'individuazione di distinti sistemi funzionali: pareti, impianti, sistemi schermanti ecc.

Il primo caso studio sviluppato in questa ricerca [13] mira a fornire progetti abitativi personalizzati per l'Italia centrale. Concepite come soluzioni modulari che possono essere rapidamente trasportate e costruite dopo un semplice processo di produzione, queste abitazioni dalla pianta quadrata possono essere combinate per creare case e villaggi multi-familiari personalizzati in grado di adattarsi sia all'ambiente che ai loro abitanti (Fig.2). Il processo generativo definisce una varietà di soluzioni progettuali che garantiscono l'adattamento del modello architettonico e la sua ottimizzazione attraverso algoritmi genetici. La definizione del design si basa sullo studio dei codici locali e dei sistemi di costruzione XLaM e Platform-Frame, con l'obiettivo di ridurre al minimo gli sprechi e ottimizzare il processo di costruzione. Considerando lo scopo della ricerca, oltre al prezzo, valutato con l'impresa di costruzioni, il consumo di energia, il comfort termico e visivo sono utilizzati come fitness e valutati attraverso processi iterativi. Infatti, mentre l'azienda possiede già una serie di strumenti di ottimizzazione relativi al processo di produzione e costruzione, l'interesse era quello di integrare in questo processo le informazioni di progettazione ambientale.

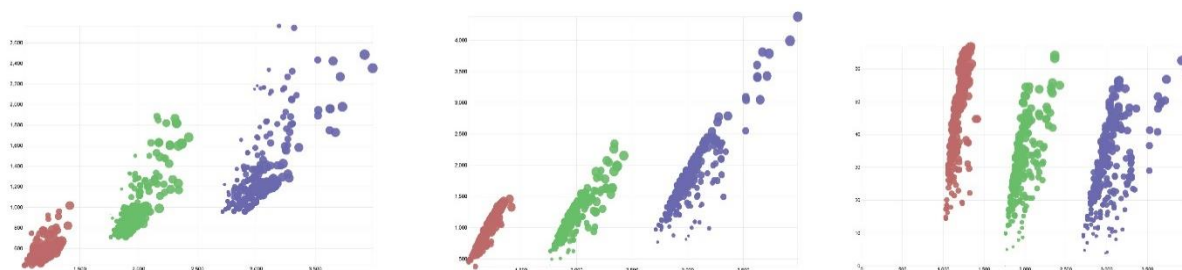
Fig. 2: Spazio delle soluzioni. Varietà di soluzioni che emergono dal modello generativo.



Uno dei principali risultati è stato la raccolta di una grande mole di informazioni che permettono di indirizzare le scelte all'interno di un processo di Data Driven Design consentendo notevoli risparmi energetici e un basso costo di costruzione. A partire dai risultati ottenuti in questa prima ricerca è emersa la necessità di indagare più nel dettaglio ogni elemento che costituisce l'involucro andando ad

individuare il ventaglio di soluzioni a disposizione dell'azienda. Così, mentre il primo caso studio proposto si concentra sull'organismo architettonico nel suo insieme, nella presente ricerca si è optato per scomporre il problema in più parti definendo diversi modelli che sebbene siano caratterizzati da una complessa varietà di soluzioni, sono più semplici da gestire nel guidare processi di Data Driven Design (Fig.3).

Fig. 3: Analisi big data per il Data Driven Design. Come risultato dell'ottimizzazione multi-obiettivo, un insieme di dati può essere utilizzato per informare il processo progettuale.



2.2. Ottimizzazione dei pacchetti costruttivi

Il perseguimento degli obiettivi di riduzione dei consumi e risparmio energetico porta i progettisti e i tecnici a ricercare soluzioni sempre più prestanti, partendo dai materiali stessi che compongono le strutture [14]. Partendo dalle stratigrafie standard utilizzate per i sistemi costruttivi dell'XLam e del Platform-Frame, la presente ricerca mira a selezionare determinate combinazioni di materiali e spessori che migliorino complessivamente le performance della parete, con particolare attenzione al contenimento dei costi e verificando l'assenza di formazione di condensa interstiziale.

Gli strumenti digitali che si basano sulla parametrizzazione delle soluzioni e sull'ottimizzazione multi-obiettivo [15, 16] consentono al progettista di analizzare e combinare grandi quantità di dati e ottenere soluzioni che presentino contemporaneamente i migliori valori dei parametri scelti come input, restituendo gli output richiesti [17]. Nello specifico, le seguenti stratigrafie sono state scelte come stratigrafie standard da cui estrapolare i dati iniziali per impostare il confronto con quelle ottimizzate:

- Platform-Frame: intonaco (10 mm), cappotto termico in EPS (60 mm), pannello OSB di irrigidimento strutturale (15 mm), telaio (interasse 60 cm) con interposto isolante in lana di vetro (12 cm), OSB (15 mm), vano tecnico isolato in lana di vetro (50 mm), doppia lastra in cartongesso (25 mm);
- XLam: intonaco (10 mm), cappotto termico in lana di vetro (80 mm), pannello in XLam a 5 strati (100 mm), vano tecnico isolato in lana di vetro (50 mm), doppia lastra in cartongesso (25 mm).

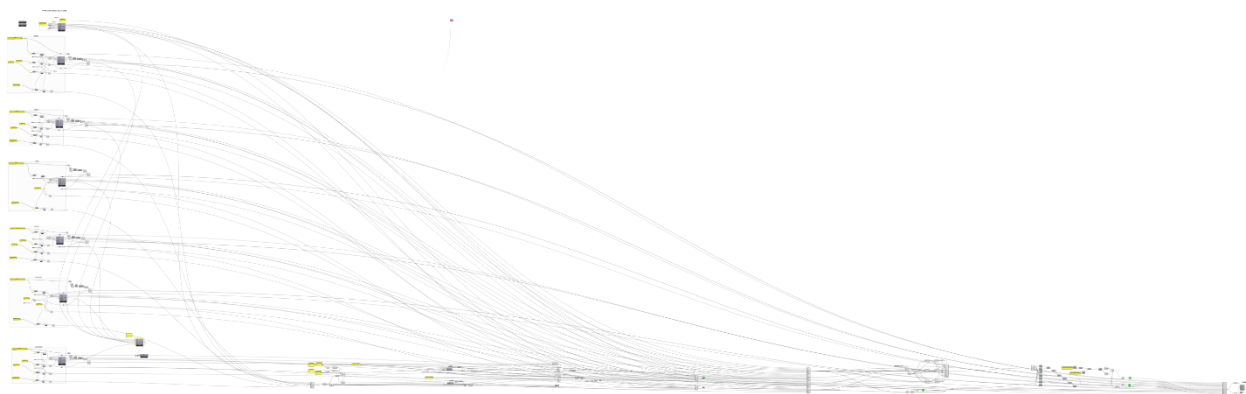
Gli output ricercati sono quelli che definiscono il comportamento estivo e quello invernale della parete: trasmittanza, trasmittanza periodica, attenuazione e sfasamento [18, 19], nonché la verifica della condensa interstiziale tramite il diagramma di Glaser. Il costo della struttura viene poi utilizzato come parametro di riferimento con cui confrontare i pacchetti ottimizzati.

I valori di output relativi a questi due pacchetti sono riportati nella Tab.1.

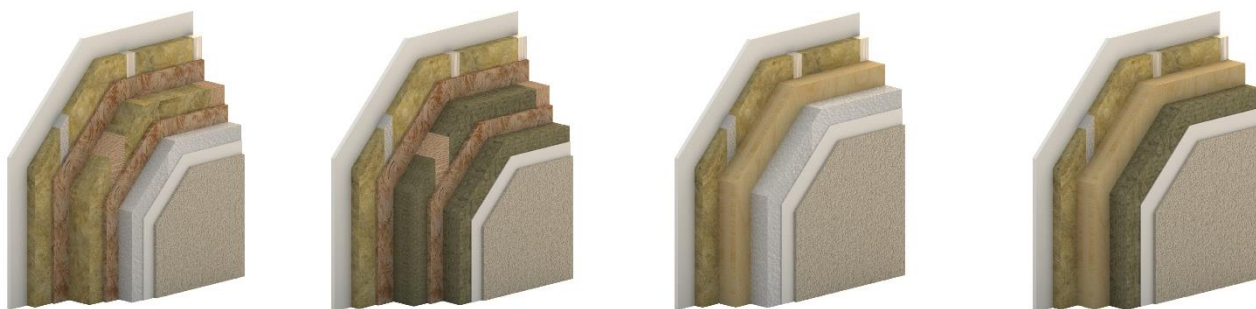
Tab. 1: Costo C, trasmittanza U, trasmittanza periodica Y_{ie} , fattore di attenuazione f e sfasamento ϕ dei due pacchetti standard.

	C [€/m ²]	U [W/m ² K]	Y_{ie} [W/m ² K]	f	ϕ [h]
PLATFORM-FRAME	226,2	0,135	0,037	0,273	9,7
XLAM	231,2	0,199	0,027	0,135	10,3

Partendo da questi valori, è stato simulato il comportamento della parete con diversi materiali e diversi spessori tramite un algoritmo realizzato in Grasshopper per Rhinoceros (Fig.4). Terminata questa prima fase di documentazione e selezione dei materiali e delle loro proprietà termiche (Tab.2), il processo di ottimizzazione della stratigrafia è stato condotto tramite il plugin Octopus per Grasshopper, che consente di applicare i principi evoluzionistici alla modellazione parametrica, al fine di ottimizzare determinati parametri. Il software, attraverso un numero impostabile di iterazioni, restituisce i pacchetti che contemporaneamente minimizzano il costo, la trasmittanza e l'attenuazione, massimizzano lo sfasamento e verificano l'assenza di formazione di condensa interstiziale (Fig.5).

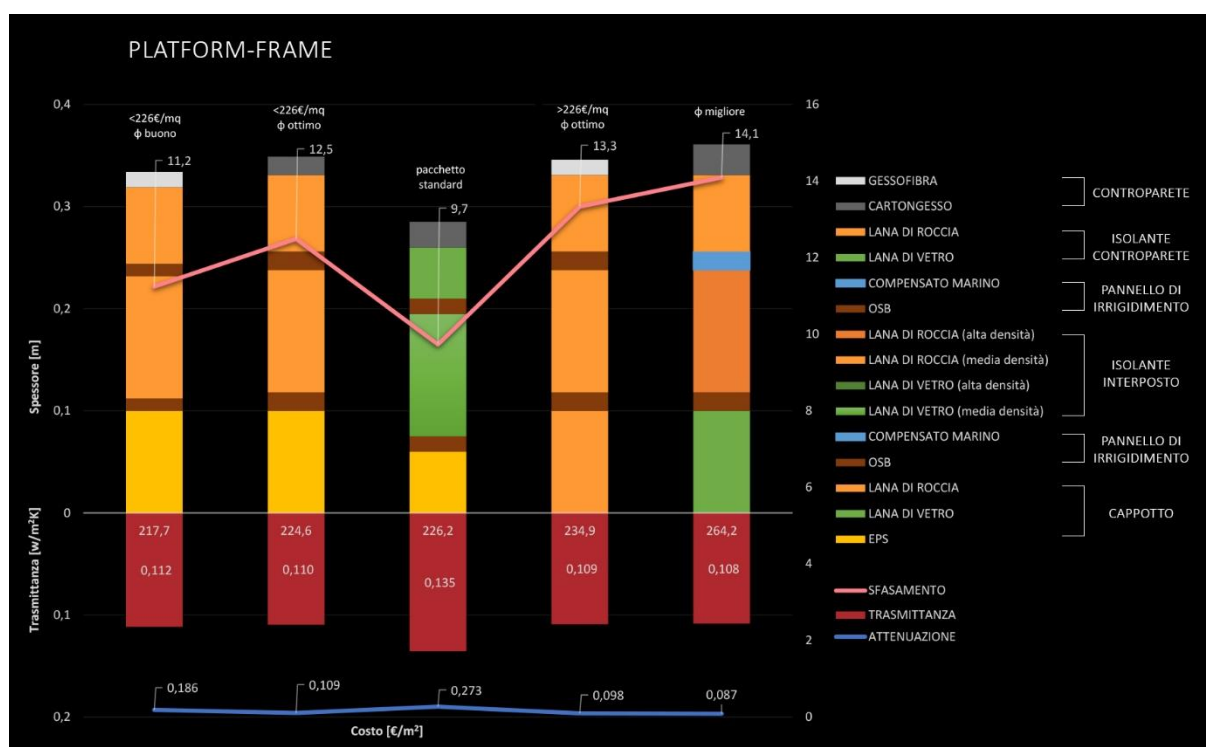
Fig. 4: Algoritmo utilizzato per ottimizzare le stratigrafie.**Tab. 2:** Selezione dei materiali e degli spessori per l'ottimizzazione delle due stratigrafie.

	MATERIALE	SPESSORI (cm)
CAPPOTTO (XLAM, PLATFORM)	EPS	6; 8; 10
	LANA DI VETRO	
	LANA DI ROCCIA	
PANNELLO DI IRRIGIDIMENTO (PLATFORM)	COMPENSATO MARINO	1.2; 1.5; 1.8
	OSB	
ISOLANTE INTERPOSTO (PLATFORM)	LANA DI VETRO media densità	12
	LANA DI VETRO alta densità	
	LANA DI ROCCIA media densità	
	LANA DI ROCCIA alta densità	
ISOLANTE CONTROPARETE (XLAM, PLATFORM)	LANA DI VETRO	5; 7.5
	LANA DI ROCCIA	

Fig. 5: Varie tipologie di stratigrafia per il sistema costruttivo Platform-Frame.

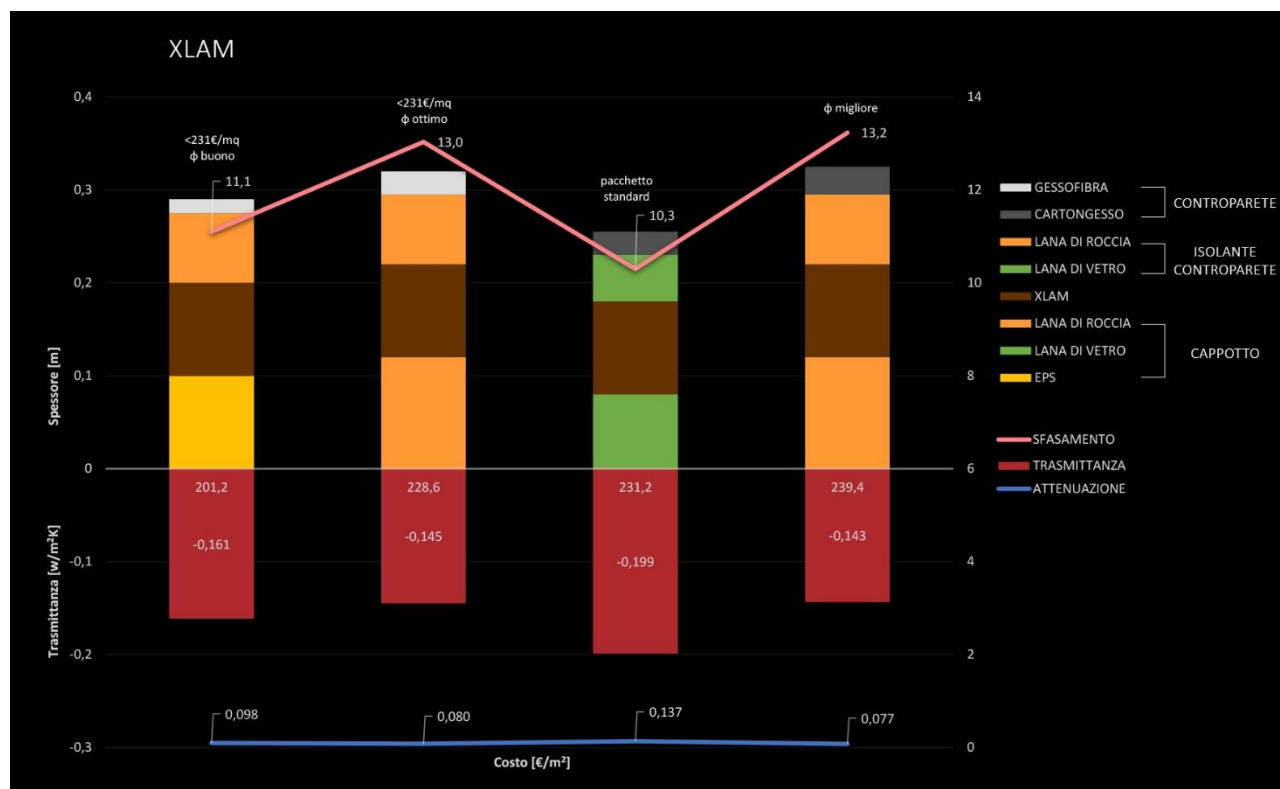
Nei due casi in esame, Octopus è stato impostato per calcolare circa 5000 possibili soluzioni, dalle quali vengono poi selezionate soltanto quelle appartenenti al Fronte di Pareto [20, 21]. Una ulteriore selezione permette quindi di individuare i pacchetti con prestazioni ottime ($\phi > 12h$, $f > 0,15$) e quelli con prestazioni buone ($10 < \phi < 12h$, $0,15 < f < 0,30$), così come definito dal DM 26/6/2009 “Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici” [22]. In funzione del costo finale, si individuano le stratigrafie più adatte, restringendo il campo di scelta a quelle con un costo inferiore o leggermente maggiore rispetto al pacchetto standard di riferimento.

Si riportano di seguito i grafici relativi ai vari pacchetti selezionati, confrontati con i due pacchetti standard dell’azienda (Fig. 6-7) e le tabelle recanti le stratigrafie nel dettaglio (Tab. 3-4).

Fig. 6: Confronto tra le prestazioni e i costi dei vari pacchetti selezionati per il sistema costruttivo Platform-Frame.

Tab. 3: Dati relativi ai 4 pacchetti ottimizzati rappresentati in Fig. 6.

CAPPOTTO	PANNELLO DI IRRIGIDIMENTO	DI ISOLANTE INTERPOSTO	PANNELLO DI IRRIGIDIMENTO	DI ISOLANTE CONTROPARETE	CONTROPARETE	C [€/m ²]	U [W/m ² K]	f	Φ [h]
EPS (0,1 m)	OSB (0,012 m)	LANA DI ROCCIA media densità (0,12 m)	OSB (0,012 m)	LANA DI ROCCIA (0,075 m)	GESSOFIBRA (0,015 m)	217,7	0,112	0,186	11,2
EPS (0,1 m)	OSB (0,018 m)	LANA DI ROCCIA media densità (0,12 m)	OSB (0,018 m)	LANA DI ROCCIA (0,075 m)	CARTONGESSO (0,018 m)	224,6	0,110	0,109	12,5
LANA ROCCIA (0,1 m)	DI OSB (0,018 m)	LANA DI ROCCIA media densità (0,12 m)	OSB (0,018 m)	LANA DI ROCCIA (0,075 m)	GESSOFIBRA (0,015 m)	234,9	0,109	0,098	13,3
LANA VETRO (0,1 m)	DI OSB (0,018 m)	LANA DI ROCCIA alta densità (0,12 m)	COMPENSATO MARINO (0,018 m)	LANA DI ROCCIA (0,075 m)	CARTONGESSO (0,030 m)	264,2	0,108	0,086	14,1

Fig. 7: Confronto tra le prestazioni e i costi dei vari pacchetti selezionati per il sistema costruttivo XLam.

Tab. 4: Dati relativi ai 4 pacchetti ottimizzati rappresentati in Fig. 7.

CAPPOTTO	ISOLANTE CONTROPARETE	CONTROPARETE	C [€/m ²]	U [W/m ² K]	f	Φ [h]
EPS (0,1 m)	LANA DI ROCCIA (0,075 m)	GESSOFIBRA (0,015 m)	201,2	0,161	0,098	11,1
LANA DI ROCCIA (0,12 m)	LANA DI ROCCIA (0,075 m)	GESSOFIBRA (0,025 m)	228,6	0,145	0,080	13,0
LANA DI ROCCIA (0,12 m)	LANA DI ROCCIA (0,075 m)	CARTONGESSO (0,030 m)	239,4	0,1438	0,077	13,2

Si osserva come, attraverso il metodo di ottimizzazione e selezione proposto, è possibile ottenere stratigrafie dalle prestazioni nettamente migliori rispetto a quelle standard, anche a costi inferiori. In particolare, per quanto riguarda il Platform-Frame, si arriva a ottenere un pacchetto con prestazioni ottime con un risparmio dello 0.7% e uno con prestazioni buone con un risparmio del 3.8%. Per l'XLam, invece, si ha un pacchetto ottimo con un risparmio dell'1% e uno buono risparmiando il 13% del costo del pacchetto standard. Se, invece, non si considerano i costi ma soltanto il miglioramento delle prestazioni energetiche, si arriva a ottenere per il Platform-Frame un miglioramento del 20% della trasmittanza e del 31% dello sfasamento, mentre per l'XLam un miglioramento del 28% della trasmittanza e del 22% dello sfasamento.

3. Conclusioni

La progettazione e la modellazione automatizzate introducono la personalizzazione di massa nel settore delle costruzioni e, sebbene questo approccio sia solo agli inizi, cambierà il modo in cui progettiamo i nostri edifici.

Lo sviluppo di strategie collaborative all'interno dell'industria delle costruzioni può guidare le moderne imprese di costruzioni ad integrare la tecnologia abilitata dalla quarta rivoluzione industriale, riducendo così l'impatto di una delle industrie più energivore al mondo. Tuttavia, un sistema delle costruzioni sostenibile può essere raggiunto solo attraverso un ecosistema creativo che coinvolga ricerca, industria e progettisti.

Il workflow proposto vuole costituire un esempio di come gli strumenti di parametrizzazione e ottimizzazione digitale possono indirizzare il progettista verso la scelta delle migliori soluzioni. Il processo di analisi dei molteplici fattori che influenzano le performance energetiche di una stratigrafia viene così notevolmente semplificato e velocizzato, fornendo dei dati che possono poi essere utilizzati come punto di partenza per la personalizzazione e l'adattamento allo specifico caso progettuale. L'impiego di algoritmi evolutivi nel processo di selezione costituisce, quindi, un ausilio alla progettazione e non uno strumento sostitutivo. In particolar modo, tale approccio consente di avere a disposizione i risultati di numerose combinazioni di dati e di poter selezionare tra questi, che sono tutti ottimizzati in funzione dei parametri scelti, quelli che nello specifico caso sono i più adatti.

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato sviluppato come accordo di ricerca tra l'Università di Perugia, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, e la start-up italiana Abitare + nell'ambito dei progetti: "Le tecniche della rappresentazione per l'innovazione delle costruzioni in legno" fondata da "POR -FSE 2014-2020: Umbria ARCO. "E" Ricerca e sviluppo per l'apparato morfologico ed energetico inerente processi realizzativi e in legno "fondato da" POR-FESR 2014-2020: Sostegno alla creazione e al consolidamento di start-up innovativo ad alta intensità di applicazione di conoscenza e alle iniziative di spin-off della ricerca ".

Bibliografia

1. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings, Official Journal of the European Union, L153 (2010).
2. Kurnitski, J.; Saari, A.; Kalamees, T.; Vuolle, M.; Niemelä, J.; Tark, T. Cost optimal and nearly zero (nZEB) energy performance calculations for residential buildings with REHVA definition for nZEB national implementation. *Energy and Buildings*, 2011, 43, 3279–3288.
3. Marszal, A.J.; Heiselberg, P.; Bourrelle, J.S.; Musall, E.; Voss, K.; Sartori, I.; Napolitano A. Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings*, 2011, 43, 971–979.
4. Buchanan, A. H.; Levine, S. B. Wood-based building materials and atmospheric carbon emissions. *Environmental Science & Policy*, 1999, 2, 427-437.
5. Cabeza, L. F.; Barreneche, C.; Miró, L.; Morera, J. M.; Bartolí, E.; Fernández, A. I. Low carbon and low embodied energy materials in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 23, 536–542.
6. Corona, P.; Quatrini, V.; Chianucci, F.; Puletti, N.; Plutino, M.; Costa, C.; Scrinzi, G.; Floris, A.; Verani, Turco R.; Bernardini V.; S.; Clementel, F.; Civitarese V.; Sperandio, G.; Menesatti P. Precision forestry: riferimenti concettuali, strumenti e prospettive di diffusione in Italia. *Forest@*, 2017, 14 (1), 1-12.
7. Davis, J.; Edgar, T.; Porter, J.; Bernaden, J.; Sarli, M. Smart manufacturing, manufacturing intelligence and demand-dynamic performance. *Computers and Chemical Engineering*, 2012, 47, 145–156.
8. Li, H.; Huang, T.; Kong, C.W.; Guo, H.L.; Baldwin, A.; Chan N.; Wong, J. Integrating design and construction through virtual prototyping. *Automation in Construction*, 2008, 17, 915–922.
9. Eastman, C.; Lee, J.; Jeong, Y.; Lee, J. Automatic rule-based checking of building designs. *Automation in Construction*, 2009, 18, 1011–1033.
10. Paoletti, I. Mass Customization in the Era of Industry 4.0: Towards Immaterial Building Technology. In *Informed Architecture*, Hemmerling M., Cocchiarella L., Eds.; Springer, Cham, 2018, 77-87.
11. Schwab, K. *The Fourth Industrial Revolution*, Crown Publishing Group, New York, 2017, ISBN 9781524758875.
12. *Digital Wood Design*, Bianconi, F., Filippucci, M., Eds; Springer, Cham, 2019.

13. Bianconi, F.; Filippucci, M.; Buffi, A. Automated design and modeling for mass-customized housing. A web-based design space catalog for timber structures. *Automation in Construction*, 2019, 103, 13-25.
14. Pisello, A. L.; Cotana, F.; Nicolini, A.; Buratti, C. Effect of dynamic characteristics of building envelope on thermal energy performance in winter conditions: In field experiment. *Energy and Buildings*, 2014, 80, 218–230.
15. Diakaki, C.; Grigoroudis, E.; Kolokotsa, D. Towards a multi-objective optimization approach for improving energy efficiency in buildings. *Energy and Buildings*, 2008, 40, 1747–1754.
16. Pernodet Chantrelle, F.; Lahmidi, H.; Keilholz, W.; El Mankibi, M.; Michel, P. Development of a multicriteria tool for optimizing the renovation of buildings. *Applied Energy*, 2011, 88, 1386–1394.
17. Coley, D. A.; Schukat, S. Low-energy design: combining computer-based optimisation and human judgement. *Building and Environment*, 2002, 37, 1241 – 1247.
18. Aste, N.; Leonforte, F.; Manfren, M.; Mazzon, M. Thermal inertia and energy efficiency – Parametric simulation assessment on a calibrated case study. *Applied Energy*, 2015, 145, 111–123.
19. Rossi, M.; Rocco, V. M. External walls design: The role of periodic thermal transmittance and internal areal heat capacity. *Energy and Buildings*, 2014, 68, 732–740.
20. Wang, W.; Zmeureanu, R.; Rivard, H. Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization. *Building and Environment*, 2005, 40, 1512–1525.
21. Wright, J. A.; Loosemore, H. A.; Farmani, R. Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm. *Energy and Buildings*, 2002, 34, 959–972.
22. Ministero dello sviluppo economico. Adeguamento del decreto del Ministro dello sviluppo economico, 26 giugno 2009 - Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici. Decreto interministeriale 26 giugno 2015; 2015.

XIX Congresso Nazionale CIRIAF

Energia e Sviluppo Sostenibile

Diagnosi e monitoraggio della riqualificazione di edifici storici secondo i principi dell'ecosostenibilità: la Certosa di Calci

Fabio Fantozzi ^{1,*}, Francesco Leccese ², Giacomo Salvadori ², Teresa Cervino ³

¹ Professore Associato nel Settore Scientifico Disciplinare ING-IND/11., Dipartimento DESTeC Via Diotallevi, 2 56126 – PISA -ITALY

² Ricercatore Universitario nel Settore Scientifico Disciplinare ING-IND/11 "Fisica Tecnica Ambientale", Dipartimento DESTeC Via Diotallevi, 2 56126 – PISA -ITALY. E-mail:

f.leccese@ing.unipi.it – giacomo.salvadori@unipi.it

³ Architetto, docente a contratto presso la facoltà di Ingegneria di Pisa, Via Diotallevi, 2 56126 – PISA -ITALY. E-mail: teresa.cervino@ing.unipi.it

* E-Mail: f.fantozzi@ing.unipi.it

Abstract: L'Università di Pisa ha investito nella riqualificazione del suo ampio patrimonio edilizio composto anche di edifici storici di pregio. Un caso molto particolare, oggetto di uno specifico Tavolo Tecnico, è rappresentato dal complesso monumentale della Certosa di Calci, che ospita il Museo di Storia Naturale e del Territorio.

Il progetto è strutturato in diversi programmi di approfondimento volti a conoscere il complesso monumentale ed a proporre linee guida per la sua conservazione, restauro e valorizzazione. In tale ambito si colloca il presente lavoro che si occupa del monitoraggio della riqualificazione della Certosa secondo i principi dell'ecosostenibilità.

Il riconoscimento del valore testimoniale di un edificio storico deve essere considerato parte integrante di un processo di progettazione sostenibile finalizzata alla salvaguardia e alla valorizzazione del patrimonio culturale. Al fine di conseguire questi obiettivi, occorrono strumenti in grado di guidare gli operatori della filiera dell'edilizia. In tale contesto la ricerca mira ad applicare con atteggiamento critico il nuovo sistema di "rating" per la certificazione di edifici storici, denominato "GBC Historic Building", messo a punto dalla "Green Building Council Italia". Lo studio parte dalla rassegna di una serie di strumenti di rating di edilizia storica attualmente disponibili e dall'analisi critica dei punti di forza e debolezza di questi. Successivamente sono raggruppate alcune schede trasversali ai vari protocolli ed applicate al caso. Dai risultati, dettagliatamente descritti, sono emerse criticità, interpretative ed applicative.

Parole chiave: *Edifici storici; sostenibilità; strumenti di rating*

Introduzione

Il tema della sostenibilità del processo edilizio e delle soluzioni tecnologiche adottabili, obiettivo ormai consolidato per le nuove costruzioni, impone, nell'ambito degli interventi di restauro e riqualificazione del patrimonio edilizio esistente, una più approfondita riflessione derivante dalla maggiore complessità delle variabili in gioco e presuppone una positiva convergenza di più operatori a diversi livelli.

Esiste ancora una profonda dicotomia tra istanze estetico-testimoniali e istanze energetico-ambientali, non ancora superata a livello nazionale e comunitario, tanto che le disposizioni attuali vigenti in materia consentono deroghe all'applicazione degli obiettivi di efficienza energetica.

Nel caso studio emergono con chiarezza i legami inscindibili tra storia (passato), presente (progettualità, scelte strategiche, visione...) e futuro (sostenibilità della permanenza e della sua governata trasformazione) di un luogo complesso in cui architettura e vita si sono sempre condizionate a vicenda. Se quindi, da un lato, il patrimonio culturale può essere visto a tutti gli effetti non solo come memoria pietrificata del passato ma anche quale risorsa attiva per il futuro, dall'altro emergono numerosi conflitti.

Tale patrimonio (nello specifico la Certosa di Calci) è certamente depositario di preziose risorse riutilizzabili ma, al tempo stesso, non rinnovabili e non sostituibili. Ciò rende assai delicato ogni processo/progetto di modificazione della materia costruita, che dovrà necessariamente avvenire senza devastare e sprecare la ricchezza esistente.

Fig.1 La Certosa di Calci



Al di là di questo, inoltre, il rapporto tra sostenibilità e patrimonio, in molte realtà attuali, si riduce spesso alla mera risposta tecnica a problemi, pur importanti, quali il risparmio energetico o l'applicazione di nuovi dispositivi tecnici alimentati da energie rinnovabili.

Il rapporto tra innovazione tecnologica e ricerca, anche in campo di tutela del patrimonio culturale quindi si riduce a un astratto processo di mera applicazione di prodotti e tecnologie che non

necessariamente costituisce una vera innovazione e, soprattutto, che non sempre innesca un effettivo, consapevole e virtuoso avanzamento culturale verso una reale sostenibilità della vita futura nei nostri territori.

Consapevoli della necessità di far fronte agli elevati consumi e alla scarsa qualità ambientale che spesso connotano il vasto patrimonio storico (con ripercussioni significative sulla conservazione dei manufatti), l'approccio all'intervento di natura conservativa richiede, dunque, un cambiamento radicale, considerando le azioni volte alla sostenibilità ambientale non più come un atto di "violenza" contro il patrimonio storico, ma come importanti ed efficaci forme di tutela.

In tale prospettiva si colloca il presente lavoro di ricerca, che vuole offrire occasioni di riflessione e di verifica se lo si immagina e si lavora affinché venga visto, non solo sul piano energetico ma soprattutto sul piano culturale, una risorsa e non un problema.

Per questi motivi, per affrontare le sfide della sostenibilità in rapporto al patrimonio storico architettonico, è anche necessario rivedere alcuni assunti teorici e metodologici, superare la talvolta esasperata segmentazione delle competenze coinvolte nel tema e lavorare in modo inter- se non trans-disciplinare, adottando così nuovamente un atteggiamento olistico e concependo l'intervento progettuale, all'interno di una logica di sostenibilità, in stretto rapporto con l'eredità testimoniale del costruito storico e non in conflitto con essa, senza compromettere la ricchezza reale e potenziale nell'ambito in cui si è chiamati ad intervenire.

Il termine "sostenibilità" viene, dunque, ulteriormente arricchito attraverso una lettura più ampia del triplice approccio "risorse-emissioni-biodiversità", in cui le istanze culturali assumono un ruolo significativo per la conservazione e la salvaguardia della risorsa storica, che rappresenta un potenziale esistente e che, pertanto, deve essere tramandata al futuro.

Contemporaneamente a questa sensibilità verso il patrimonio storico da tutelare, rimane importante suggerire interventi che non siano vincolati da un'attenta salvaguardia dell'ambiente in cui i consumi energetici giocano un ruolo fondamentale.

Gli interventi di natura conservativa diventano dunque azioni sostenibili e, pertanto possono essere valutate attraverso strumenti e metodi pertinenti a tale contesto e, soprattutto, nell'ottica di una "metrica" condivisa e confrontabile, propria dei processi edilizi sostenibili contemporanei.

Al fine di conseguire questi obiettivi, sono necessari strumenti in grado di guidare adeguatamente gli operatori della filiera dell'edilizia.

In tal senso la ricerca è partita dallo **studio dei sistemi a punteggio**, nazionali ed internazionali, per la valutazione e certificazione ambientale del costruito.

Si tratta di strumenti pensati per rispondere alla necessità di definire specifici requisiti e suggerire approcci e modelli di calcolo utili a dimostrare il raggiungimento, misurando così una prestazione. Da una rassegna dei più noti sistemi nazionali ed internazionali a punteggio (LEED, BREAM, ITACA) è emerso che i principali contenuti riguardano la sostenibilità del sito, la gestione efficiente delle risorse, l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche ed ambientali, il comfort degli spazi confinati, l'adozione di materiali sostenibili e l'implementazione di adeguati modelli di gestione, temi questi che coinvolgono l'immobile in modo trasversale nel corso del suo ciclo di vita, dalle fasi di progetto e costruzione fino alla gestione in esercizio del manufatto edilizio (Figura 1).

Poiché l'obiettivo è quello di coniugare le azioni di recupero di edifici storici (in questo contesto la Certosa di Calci) con il perseguimento di elevate prestazioni energetiche ed ambientali, l'analisi dello stato dell'arte si è estesa agli strumenti di certificazione ambientale di edifici storici presenti sul territorio italiano. Si è pertanto analizzato il GBC Historic Building, sviluppato dal Green Building Council Italia e le linee guida di indirizzo Mibact per il miglioramento dell'efficienza energetica nel patrimonio culturale dell'architettura e dei centri e nuclei storici e urbani. A partire dall'analisi di tali protocolli, il lavoro di ricerca mira a studiare e comprendere l'applicabilità di uno strumento di "rating" per la certificazione di edifici oggetto di interventi di natura conservativa.

Metodologia

Come si evince dal quadro degli obiettivi precedentemente esposti, la ricerca prevede sia uno studio di tipo documentale, sia una serie di indagini dirette sulla Certosa. Nel primo caso, lo studio è funzionale all'acquisizione delle conoscenze specifiche e delle fonti primarie alla base delle tematiche legate agli strumenti di rating. Nel secondo caso, le indagini dirette permettono di contestualizzare le criticità emerse dall'analisi degli strumenti, affiancando alle nozioni di tipo teorico-documentale i casi studio significativi. Tali casi studio migliorano la comprensione degli elementi critici connessi all'ambito di indagine e delle potenzialità insite nella strategia di elaborazione di uno strumento di valutazione ambientale ad hoc per la Certosa di Calci.

Per le metodologie di acquisizione dei dati, la ricerca si è avvalsa di :

- indagini bibliografiche e sitografiche;
- colloqui con gli Enti Gestori per l'acquisizione di informazioni sull'utilizzo e la gestione di un campione di studio rappresentativo del complesso monumentale;
- sopralluoghi alle strutture individuate come oggetto di indagine;

Nella prima fase della ricerca, dunque, si è fatta un' analisi tra i sistemi di valutazione e di certificazione di sostenibilità ambientale differenziati per due tipi di approccio: metodo qualitativo e metodo quantitativo.

- Metodo qualitativo (o a punteggio).

Tale metodo è basato su requisiti definiti a cui corrispondono specifici pesi e punteggi la cui somma globale indica il livello di sostenibilità energetica e ambientale dell'edificio (per esempio il LEED o il BREEAM). I sistemi a punteggio sono strumenti pensati per rispondere alla necessità di definire specifici requisiti e suggerire approcci e modelli di calcolo utili a dimostrarne il raggiungimento, misurando così una prestazione.

- Metodo quantitativo.

Tale metodo fa riferimento all'analisi LCA, valutando e quantificando l'energia inglobata dal fabbricato durante l'intero arco di vita.

Successivamente è stata svolta una analisi comparativa dei principali protocolli esistenti che adottano il metodo a punteggio, ed in particolare di quelli attualmente utilizzati in Italia: il marchio CASACLIMA, il metodo LEED, il metodo GBC, il marchio ITACA.

L'analisi sullo stato dell'arte si è poi estesa conseguentemente al protocollo GBC Historic Building, prima analizzato nella sua struttura generale e poi nelle sue specifiche aree tematiche.

Sempre nella prima parte della ricerca si è affrontato lo studio delle linee guida di indirizzo Mibact per il miglioramento dell'efficienza energetica nel patrimonio culturale.

Dall'analisi bibliografica dei protocolli suddetti si è passati, nella seconda parte della ricerca, alla rielaborazione ed all'analisi critica di questi.

Nello specifico, del protocollo GBC Historic Building sono stati presi in considerazione tutti i crediti delle relative aree tematiche e, per ognuno, è stato spiegato il contenuto generale, le criticità a livello interpretativo e applicativo (ove possibile) e le soluzioni proposte, nate anche dal confronto con le Linee di Indirizzo del MIBACT e i vari riferimenti normativi. Per ogni credito sono stati realizzati, inoltre, uno schema logico iniziale, che inquadra in maniera generale il credito con i suoi vari sotto-crediti e le relative soluzioni, e una scheda riassuntiva finale che rappresenta un elemento più immediato rispetto al protocollo e di veloce leggibilità, pensato per gli addetti ai lavori. Le soluzioni messe in evidenza per ciascun credito tengono conto di tre parametri fondamentali:

- l'applicabilità alla Certosa di Calci
- il mantenimento dell'integrità storica del bene monumentale
- il miglioramento del comfort indoor per gli occupanti.

L'ultima parte della ricerca si presenta quale momento di riflessione circa il percorso effettuato e le criticità emerse, nonché di verifica tra gli obiettivi proposti ed i risultati raggiunti. L'ultimo sguardo viene rivolto ai possibili sviluppi futuri della ricerca, ovvero agli scenari che, per scelta operativa o di indirizzo, non sono rientrati nella presente trattazione, ma che ne costituiscono proseguimento e completamento naturale.

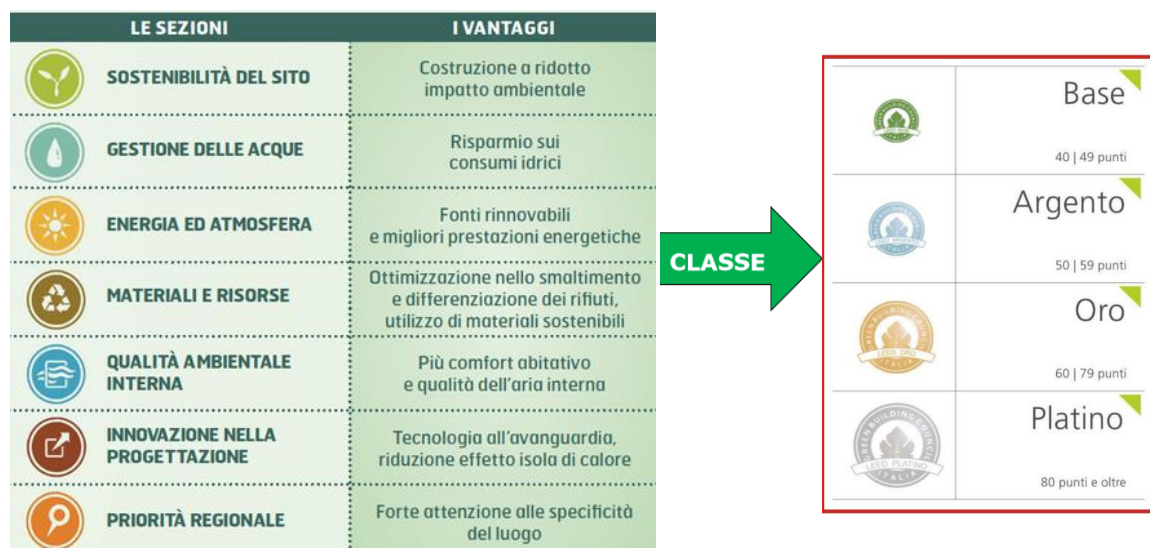
Risultati

Dai risultati conseguiti è emerso che in Italia, il quadro dei protocolli di valutazione della costruzione sostenibile è piuttosto frammentato ma, in generale, vede affermarsi a livello pubblico/regionale il protocollo ITACA mentre sul mercato privato, di respiro internazionale, il protocollo LEED.

Dall'analisi comparativa e rivisitazione critica dei principali protocolli esistenti, ed in particolare di quelli attualmente utilizzati in Italia, è emerso che i sistemi a punteggio per la valutazione e certificazione del livello di sostenibilità ambientale del costruito sono strumenti pensati per rispondere alla necessità di definire specifici requisiti e suggerire approcci e modelli di calcolo utili a dimostrarne il raggiungimento, misurando così una prestazione.

I principali contenuti dei più noti sistemi internazionalmente diffusi, quali ad esempio LEED, BREEAM, riguardano infatti la sostenibilità del sito, la gestione efficiente delle risorse, l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche e ambientali, il comfort degli spazi confinati, l'adozione di materiali sostenibili e l'implementazione di adeguati modelli di gestione, temi questi che coinvolgono l'immobile in modo trasversale nel corso del suo ciclo di vita, dalle fasi di progetto e costruzione fino alla gestione in esercizio del manufatto edilizio. Tali strumenti però non coniugano il perseguimento di elevate prestazioni energetiche e ambientali con le azioni di recupero di edifici storici.

In questo quadro dunque si inserisce il protocollo GBC Historic Building.

Figura 2. Aree tematiche del Protocollo LEED

Lo strumento operativo del Protocollo si caratterizza come sistema a punteggio di natura volontaria (come tutti i sistemi di certificazione ambientale), per la certificazione del livello di sostenibilità degli interventi di restauro e recupero di edifici storici finalizzato a raggiungere prestazioni energetico-ambientali elevate, ma preservando il valore storico e testimoniale dei manufatti sottoposti ad interventi importanti. Il “rating system” si basa sulla struttura del protocollo “LEED Italia 2009 Nuove Costruzioni e Ristrutturazioni”, introdotto nel 2010 dall’associazione “Green Building Council Italia” a seguito di una attività di traduzione linguistica e trasposizione normativa dall’originale versione “LEED New Construction & Major Renovation” (versione 2009) sviluppata da “US Green Building Council”. Rispetto alle aree tematiche che caratterizzano gli ormai consolidati protocolli LEED/GBC, il nuovo protocollo ne aggiunge una, relativa all’intervento sostenibile in ambito conservativo, denominata “Valenza storica” (VS) che, attraverso l’individuazione di precise metodologie d’indagine e specifici principi operativi, è caratterizzata dal fine ultimo di preservare tutto ciò che è riconosciuto quale “testimonianza avente valore di civiltà”, favorendo un elevato livello di sostenibilità del processo mediante la valorizzazione delle qualità positive del costruito pre-industriale.

Come nei sistemi LEED/GBC esistenti, in “GBC Historic Building” la distribuzione dei punti è imperniata sugli effetti delle azioni alla base di ogni credito sull’ambiente e sulla salute umana rispetto ad un insieme di categorie di impatto ambientale e umano coinvolte nelle fasi di progettazione, di costruzione, di uso e di manutenzione dell’edificio, quali ad esempio, i gas serra, l’uso di combustibili fossili, gli agenti tossici e cancerogeni, l’inquinamento dell’aria e dell’acqua e le condizioni dell’ambiente interno. Per quantificare l’importanza delle differenti categorie di impatto, ciascun credito si avvale di una combinazione di approcci di valutazione e verifica degli impatti stessi, inclusi, ad esempio, la modellazione energetica, la valutazione del ciclo di vita e l’analisi dei trasporti.

“GBG Historic Building” è dunque strutturato secondo una serie di requisiti, alcuni dei quali sono obbligatori per conseguire la certificazione, denominati “prerequisiti”, ed altri sono volontari e premianti con un punteggio, denominati “crediti”. I citati requisiti, siano essi afferenti a prerequisiti o

a crediti, sono raggruppati all'interno di otto aree tematiche (valenza storica, sostenibilità del sito, gestione delle acque, energia e atmosfera, materiali e risorse, qualità ambientale interna, innovazione nella progettazione, priorità regionale).

Il sistema prevede un punteggio massimo conseguibile pari a 110, suddiviso in 10 punti distribuiti tra le aree "innovazione per la progettazione" e "priorità regionale", i 100 distribuiti sulle restanti aree. La somma dei punti conseguiti nelle diverse aree tematiche definisce il livello di certificazione finale.

Lo schema di certificazione "GBC Historic Building" è interamente attivato da GBC Italia, che ricopre sia il ruolo di "standard setter", cioè il soggetto che definisce lo schema in termini di processo e di contenuti di carattere tecnico, sia di "certificatore" dei progetti. Ad ogni prerequisito e credito del protocollo sono associati dei form finalizzati a dimostrare la conformità delle azioni progettuali rispetto ai requisiti del sistema di certificazione, conformità che deve essere dimostrata nella fase di progettazione e/o costruzione in funzione della singola azione.

Esempio di valutazione di un requisito dell'area tematica "Materiali e risorse"

MR PREREQUISITO 2 - Gestione dei rifiuti da demolizione e costruzione: analisi di applicabilità

Descrizione del prerequisito

L'obiettivo del "Prerequisito 2 – Gestione dei rifiuti da demolizione e costruzione" è quello di ridurre, o addirittura eliminare, il quantitativo di rifiuti che viene conferito in discarica. La scheda del prerequisito rende obbligatorio sviluppare un piano di smaltimento dei rifiuti e l'identificazione di quelli che possono essere salvati dal conferimento in discarica. Sono consentite due tipologie di smaltimento dei rifiuti da riciclare: la prima prevede la separazione in sito delle varie tipologie di rifiuti e il ritiro da parte di una ditta autorizzata; la seconda prevede invece il ritiro dei rifiuti non differenziati da parte di una ditta autorizzata, la quale provvederà poi alla differenziazione e al riciclo. Tale prerequisito è esattamente identico al "Credito 2 – Gestione dei rifiuti da demolizione e costruzione", quello che li differenzia è il fatto che il prerequisito obblighi a rispettare una soglia percentuale minima, mentre il credito è finalizzato all'ottenimento facoltativo di 1 o 2 punti raggiungendo soglie percentuali più alte. La percentuale minima obbligatoria di rifiuti da riciclare o recuperare è del 30%.

Criticità interpretative

Nella descrizione del prerequisito, presente nella relativa scheda, non è chiaro se la valutazione del rispetto dei requisiti sia da eseguirsi prima o dopo l'esecuzione degli interventi. La richiesta di redazione di un "Piano di gestione dei rifiuti da demolizione e costruzione", sulla base del quale condurre la valutazione, porta a pensare che quest'ultima debba essere effettuata anticipatamente rispetto all'esecuzione dei lavori. Tuttavia la valutazione del rispetto dei requisiti effettuata successivamente al termine dei lavori consentirebbe di avere una determinazione certa del quantitativo e del tipo di rifiuti prodotti.

Criticità applicative

Lo studio della riciclabilità dei rifiuti da demolizione presuppone una conoscenza approfondita dello stato di fatto e questo non è sempre possibile in edifici storici, nei quali la difficoltà di eseguire saggi e di accedere a determinati ambienti porta alla necessità di aggiornare il progetto in corso d'opera a causa del reperimento di informazioni durante il cantiere stesso. Inoltre il cantiere edile, per sua natura, non consente di quantificare anticipatamente in maniera esatta i rifiuti che verranno prodotti, dunque lo stesso "Piano di gestione dei rifiuti da demolizione e costruzione", sulla base del quale viene applicato il criterio, perde di attendibilità. Riteniamo pertanto che tale valutazione debba essere effettuata al termine dei lavori, in modo da garantirne per certo il rispetto dei requisiti.

Oltre al GBC Historic Building, ad oggi unico strumento a punteggio per la valutazione e certificazione del livello di sostenibilità degli interventi di restauro e recupero di edifici storici, si è

affrontato lo studio delle linee guida di indirizzo Mibact per il miglioramento dell'efficienza energetica nel patrimonio culturale.

Le Linee di indirizzo forniscono indicazioni per la valutazione e per il miglioramento della prestazione energetica del patrimonio culturale tutelato, con riferimento alle norme italiane in materia di risparmio e di efficienza energetica degli edifici. Esse sono state redatte con l'intento di fornire indicazioni operative sia ai progettisti che al personale del Ministero dei beni e delle attività culturali e del turismo. Ai primi viene fornito uno strumento per la valutazione della prestazione energetica dell'edificio storico nelle condizioni esistenti e criteri operativi per il progetto degli eventuali interventi di riqualificazione energetica, opportunamente calibrati sul rispetto delle specifiche peculiarità del patrimonio culturale. Al personale del Ministero viene offerto uno strumento scientifico snello, in grado tuttavia di coniugare rigore scientifico e aggiornamento tecnico sulla materia, così da consentirgli, anche in tale campo, di interloquire con piena consapevolezza con i progettisti o i proponenti. La finalità dello strumento di rating è quella di fornire agli organi preposti alla tutela del patrimonio culturale criteri e metodi per una compiuta valutazione critica sia dei progetti presentati ai fini del rilascio delle autorizzazioni di legge, sia per quelli predisposti direttamente, affinché tengano in debita considerazione anche gli aspetti della prestazione energetica degli edifici tutelati. Tutto questo anche nell'ottica, ormai ineludibile, soprattutto per una pubblica Amministrazione, di un razionale contenimento dei costi di gestione delle strutture date in consegna. Le Linee d'indirizzo affrontano anche le delicate ricadute di un uso efficiente dell'energia per la conservazione e la protezione dei centri e dei nuclei storici e dell'architettura rurale ai fini paesaggistici e sulla qualità dell'intervento contemporaneo per la riqualificazione degli edifici e dei nuclei urbani, ritenendo tali tematiche strettamente interconnesse, se non indissolubili, rispetto a quelle dei beni architettonici sottoposti a tutela.

Tale strumento, dunque, non è caratterizzato da un sistema di valutazione a punteggio, non fornisce soluzioni pronte all'uso, né prescrive metodologie a carattere vincolante, in considerazione delle peculiarità dei beni interessati, della naturale evoluzione nel tempo delle tecnologie adoperate e dei futuri aggiornamenti normativi. Questo vuole guidare l'intelligenza e la sensibilità del personale e dei progettisti per il raggiungimento istituzionale primario della protezione e conservazione del patrimonio culturale, ottimizzandone, laddove possibile, il livello di prestazione energetica.

Dal confronto dei due strumenti presi in esame, GBC Historic Building e Linee guida MIBAC, si è scelto di adottare il primo come struttura base di valutazione ed integrarlo con le indicazioni del secondo strumento.

In particolare sono state effettuate valutazioni critiche di alcune aree tematiche del protocollo GBC HB. Nella scelta di tali aree si è cercato di privilegiare quelle che fossero più compatibili al caso studio per quanto concerne la facilità interpretativa ed applicativa.

Nello specifico si è cercato di privilegiare l'analisi delle aree tematiche alle quali il "rating system" ha attribuito il maggior peso: "Valenza storica" (20 su 110 punti) e "Energia e atmosfera" (29 su 110): tematiche che coniugano al meglio le istanze estetico-testimoniali con quelle energetico-ambientali.

Dalle indagini è emerso quanto segue.

Alcuni prerequisiti (obbligatori per ottenere la certificazione) non sono facilmente applicabili, come per esempio il prerequisito Commissioning di base dei sistemi energetici, facente parte dell'area tematica "Energia e atmosfera". La difficoltà è legata molto spesso alla non sempre facile reperibilità delle informazioni richieste dal protocollo, o per le difficoltà di interazione riscontrate con i responsabili del complesso monumentale, o perché mancanti (come il progetto degli impianti, trattandosi di un edificio storico).

Fig.3 Proposta di scheda tipo

MATERIALI E RISORSE		RESTAURO	MR2
Gestione dei rifiuti da demolizione e costruzione			
AREA DI VALUTAZIONE		CATEGORIA	
Materiali e risorse		Requisito	
FINALITÀ		PESO DEL CRITERIO	
Devviare i rifiuti delle attività di demolizione e costruzione dal conferimento in discarica o agli inceneritori. Reimmettere le risorse riciclabili recuperate nel processo produttivo e reindirizzare i materiali riutilizzabili in appositi siti di raccolta.		nella categoria	14,3%
		nel protocollo	1,8%
REQUISITI			
A seguito di un censimento iniziale finalizzato all'individuazione dei materiali di pregio (riutilizzabili in edifici di analoghe caratteristiche storiche) da non conferire in discarica, riciclare e/o recuperare i rifiuti non pericolosi derivanti dalle attività di cantiere. Sviluppare e implementare un Piano di Gestione dei Rifiuti da Demolizione e Costruzione che, come minimo, identifichi i materiali devianti dal conferimento in discarica. Tale piano deve essere aggiornato durante l'esecuzione dei lavori qualora i materiali demoliti differiscano da quelli individuati in fase di progetto o differiscano in quantità. Il terreno di scavo e i detriti risultanti dallo sgombero del terreno non contribuiscono a questo credito. I calcoli possono essere fatti secondo il peso o il volume, mantenendo poi la stessa unità di misura per tutti i calcoli. I calcoli devono essere eseguiti successivamente al termine dei lavori in modo da garantire che il quantitativo di rifiuti prodotti sia correttamente aggiornato. CASO 1. Rifiuti separati in sito I rifiuti di demolizione e di costruzione vengono separati in sito in modo differenziato prima di essere prelevati da una ditta autorizzata e convenzionata, la quale effettua lo stoccaggio differenziato ed effettua il riciclo direttamente e/o cede i rifiuti differenziati a terzi. E/OPPURE CASO 2. Rifiuti separati non in sito I rifiuti di demolizione e di costruzione non vengono separati in sito, ma vengono prelevati in modo indifferenziato da una o più ditte autorizzate e convenzionate, le quali li trasportano in un proprio sito autorizzato e appositamente attrezzato, dove per conto dell'impresa di costruzione effettua la differenziazione e lo stoccaggio differenziato. Mentre la differenziazione avviene separatamente per il cantiere interessato, lo stoccaggio differenziato riunisce i rifiuti differenziati di più cantieri e/o provenienze. A valle della differenziazione e dello stoccaggio, la ditta che svolge il servizio effettua il riciclo in proprio e/o cede i rifiuti differenziati a terzi.			
SCALA DI PRESTAZIONE		PERCENTUALE	PUNTI
percentuale minima		75%	1
percentuale minima		95%	2

L'applicabilità dei prerequisiti riscontra infine un'ulteriore criticità legata ai vincoli architettonici e paesaggistici della Certosa, che impediscono la realizzazione di alcuni interventi suggeriti dal protocollo. Alla luce delle criticità individuate sono state rielaborate le schede (fig.03) di alcune aree tematiche migliorandone innanzitutto la leggibilità e il layout ma soprattutto correggendo le ambiguità interpretative di ciascun prerequisito e requisito.

Sono state pertanto proposte alcune alternative ai suggerimenti del protocollo, ma non avendo dati sufficienti per validarne e verificarne l'applicabilità (conformità), (per esempio il calcolo energetico), non è stato possibile attribuire un punteggio ad ogni credito.

Il problema principale nell'applicazione di tale protocollo alla Certosa di Calci è sicuramente rappresentato dal suo essere un bene monumentale vincolato, con grande valore storico e la presenza di diversi elementi di pregio: l'obiettivo è quindi quello di perseguire una strada indirizzata, dal punto di vista della "Qualità Ambientale Interna", a mediare tra le due posizioni estreme, una volta alla conservazione dell'integrità del complesso storico e l'altra volta a migliorare il comfort indoor degli ambienti per gli occupanti.

Le criticità individuate si possono distinguere in due casi principali:

- criticità di tipo interpretativo
- criticità di tipo applicativo

Sicuramente le seconde fanno capo a quanto detto prima, poichè in diverse situazioni risulta complesso proporre ed attuare soluzioni di tipo innovativo in un complesso monumentale di questa portata e quindi si opta per soluzioni conservative che nascono e si sviluppano secondo il principio del minimo intervento.

In merito alle criticità di tipo interpretativo, si sono evidenziate diverse difficoltà, sia dal punto di vista meramente linguistico, ma anche e soprattutto dal punto di vista della reperibilità delle informazioni, troppo spesso difficili da trovare e complesse nella relativa applicazione.

Per quanto riguarda la soddisfazione dei requisiti dell'area Qualità Interna, i crediti in questione sono facilmente conseguibili, anche se c'è da precisare che la realizzazione di impianti termici e illuminotecnici è limitata dal vincolo storico-artistico di minimo intervento e che la valutazione dei parametri di comfort visivo e termico possono essere determinati solo in specifiche aree della Certosa, ovvero in quei locali dove le funzioni assolve e la frequenza di occupanti sono tali da permettere il calcolo dei parametri richiesti.

Per quanto riguarda l'area tematica relativa alla Gestione delle acque, in particolare, il complesso della Certosa ha i presupposti adatti per conseguire la prestazione esemplare nella Gestione Acque, in quanto è possibile sfruttare a pieno il recupero delle acque piovane tramite le falde di copertura e soprattutto tramite la riqualificazione del vecchio sistema di canali e pozzi ideato e utilizzato ai tempi dai monaci.

Pertanto il complesso certosino potrebbe rappresentare una soluzione esemplare di integrazione dei principi di sostenibilità ambientale, nei confronti del risparmio d'acqua, alla rivalorizzazione di dispositivi ad alto valore sia storico/artistico che ingegneristico.

Fig.4: Sistema di gestione acque meteoriche

Per quanto concerne l'area tematica "Materiali e risorse" nel prerequisito "gestione dei rifiuti da demolizione e costruzione", lo studio della riciclabilità dei rifiuti da demolizione presuppone una conoscenza approfondita dello stato di fatto e questo non è sempre possibile in edifici storici, nei quali la difficoltà di eseguire saggi e di accedere a determinati ambienti porta alla necessità di aggiornare il progetto in corso d'opera a causa del reperimento di informazioni durante il cantiere stesso.

Inoltre il cantiere edile, per sua natura, non consente di quantificare anticipatamente in maniera esatta i rifiuti che verranno prodotti, dunque lo stesso "Piano di gestione dei rifiuti da demolizione e costruzione", sulla base del quale viene applicato il criterio, perde di attendibilità. Riteniamo pertanto che tale valutazione debba essere effettuata al termine dei lavori, in modo da garantirne per certo il rispetto dei requisiti.

Per quanto riguarda l'aspetto normativo, quasi tutte le aree tematiche sono strutturate in maniera sufficientemente completa: sono elencate norme, regolamenti, pubblicazioni e siti web a cui fare riferimento.

Si propone soltanto di strutturare i vari crediti secondo l'idea di assegnare un punteggio diverso non solo in base alle percentuali di riduzione di certi parametri, ma anche in base alla sostenibilità delle tecnologia utilizzate per soddisfare le richieste del protocollo, privilegiando quelle maggiormente sostenibili per l'ambiente e che più si legano con il carattere storico dell'edificio, (essendo il GBC HB un protocollo che deve sottolineare la valenza storica dei complessi oggetto dello studio).

Inoltre i crediti delle varie aree tematiche del GBC sono spesso connessi tra di loro: in ogni credito sono infatti elencati i crediti correlati che conviene o è necessario sviluppare insieme, in modo da guidare il progettista nella scelta delle strategie più convenienti da adottare.

Pertanto, si vuole fornire uno strumento di più semplice consultazione e interpretazione, che dia delle linee guida chiare e precise, riferendosi strettamente alla normativa e lasciando una certa libertà di scelta agli addetti ai lavori in fase di progettazione.

Prospettive di sviluppo

GBC HB è uno strumento di “rating system” di nuova elaborazione, che nasce per rispondere, da un lato, alle esigenze di mercato dell’edilizia specificamente rivolto agli edifici storici, e, dall’altro, alle esigenze ambientali di riduzione dell’emissione di sostanze climalteranti imputabili al segmento del patrimonio storico, senza comprometterne i caratteri storico-documentali. Uno sforzo importante è rivolto verso l’implementazione di iniziative di mercato nell’ottica di non compromettere il livello di sostenibilità ambientale degli edifici storici che, in una visione di tipo olistico, dovrebbero avere un comportamento energetico virtuoso. In questo senso, al fine di validare e verificare la conformità del nuovo protocollo rispetto alle caratteristiche del patrimonio storico, GBC HB è stato applicato su alcuni casi studio ed il primo certificato secondo tale protocollo è il complesso delle Scuderie della Rocca S. Apollinare, antica abbazia benedettina situata nei pressi di Perugia. Il complesso ha ottenuto il livello di certificazione ORO, con 72 punti su 110. La particolarità è che tale certificazione è stata conseguita con un punteggio pari a 0 per la Valenza storica, area tematica relativa all’intervento sostenibile in ambito conservativo, che contraddistingue il protocollo Historic Building dagli ormai consolidati protocolli LEED/GBC. Da tale considerazione parte dunque lo spunto per i prossimi sviluppi di ricerca che mirano ad analizzare l’applicabilità di tale area al caso studio per poter conseguire il massimo punteggio attribuito.

Gli sviluppi di ricerca infine, mirano ad approfondire le analisi delle esigenze di comfort termico, acustico e visivo degli addetti ai lavori e visitatori con quelle di conservazione delle opere oltre che il rapporto costi-benefici.

Bibliografia

- Boarin P., Guglielmino D., Pisello A.L., Cotana F. 2014. Sustainability assessment of historic buildings: Lesson learnt from an Italian case study through LEED rating system. *Energy Procedia*, 61, 1029-1032
- Cabeza L.F., de Gracia A., Pisello A.L. 2018. Integration of renewable technologies in historical and heritage buildings: A review. *Energy and Buildings*, 177, 199-111
- Castaldo V.L., Coccia V., Cotana F., Pignatta G., Pisello A.L., Rossi F. 2015. Thermal-energy analysis of natural “cool” stone aggregate as passive cooling and global warming mitigation technique. *Urban Climate*, 14, 301-314
- Castaldo V.L., Pisello A.L., Boarin P., Petrozzi A., Cotana F. 2017. The experience of international sustainability protocols for retrofitting historical buildings in Italy. *Buildings*, 7 (2), 52.

- Pisello A.L. Cotana. F., Nicolini A., Brinchi L. 2013. Development of clay tile coatings for steep-cool roofs. *Energies*, 6,3637-3653.
- Pisello A.L., Pignatta G., Castaldo V.L., cotana F., 2014. Experimental analysis of natural gravel covering as cool roofing and cool pavement. *Sustainability (Switzerland)*, 6(8), 4706-4722.
- MIBACT Linee di indirizzo per il miglioramento dell'efficienza energetica nel patrimonio culturale
- Fabbri K. et Al., Il miglioramento dell'efficienza energetica dell'edilizia preindustriale di base: approccio conoscitivo e strumenti innovativi per il governo delle trasformazioni, in Atti del convegno: Scienza e Beni Culturali, Governare l'innovazione. Processi, strutture, materiali e tecnologie tra passato e futuro, Bressanone, 21-24 giugno 2011, pp. 663-672.
- Green Building Council Italia. Sistema di verifica GBC Historic Building - versione completa del protocollo.
- Itaca, Protocollo Itaca 2009, Valutazione energetico - ambientale, Linee guida, 2009, www.itaca.it

Normativa di riferimento:

- UNI/PdR 13.0:2015 Sostenibilità ambientale nelle costruzioni - Strumenti operativi per la valutazione della sostenibilità - Inquadramento generale e principi metodologici
- UNI/PdR 13.1:2015 Sostenibilità ambientale nelle costruzioni - Strumenti operativi per la valutazione della sostenibilità - Edifici residenziali
- MiSE. 2015. Decreto interministeriale 26 giugno 2015. Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici. S.O. n.39 alla Gazzetta Ufficiale Serie Generale n.162 del 15.07.2015. Roma: Poligrafico dello Stato.

Webgrafia:

- <http://www.gbitalia.org/web/guest/gbc-historic-building-doucmenti>
- Metadistretto Veneto della Bioedilizia – Metadistretto Veneto dei Beni Culturali, Linee guida A.T.T.E.S.S., Edilizia storica e Sostenibilità ambientale. La qualità delle prestazioni energeticoambientali nella manutenzione dell'architettura storica, inserite il 17 maggio 2011 in: <http://www.veneto.beniculturali.it/eventi-culturali/attest-pubblicazione-delle-linee-guidaediliziastorica-e-sostenibilit%C3%A0-ambientale>

XIX Congresso Nazionale CIRIAF

Energia e Sviluppo Sostenibile

Wearable sensing techniques for investigating historical urban heat islands perceived by pedestrians

Samuele D'Eramo¹, Ilaria Pigliautile¹, Cristina Piselli^{1,2}, Anna Laura Pisello^{1,2,*}

¹ CIRIAF - Interuniversity Research Centre, University of Perugia, Via G. Duranti 63, 06125, Perugia, Italy

² Department of Engineering, University of Perugia, Via G. Duranti 67, 06125, Perugia, Italy

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: anna.pisello@unipg.it

Abstract: This paper concerns the microclimate analysis of historical city centre aimed at better understanding people comfort in dense urban areas with architectural ancient value. Given traffic limitation for cars and other vehicles, and also restrictions about sensing techniques, wearable sensing techniques are here showed and implemented. The urban heat island (UHI) conditions and local granular data in terms of heat and light forcing are assessed during the course of “monitored walks” by tester pedestrians. Nighttime UHI rises up to almost 3°C detectable only through pedestrians’ paths. Even stronger issues may be expected in summer conditions and during heat waves, representing the focus of next research developments.

Keywords: Urban heat island; wearable sensing technique; thermal comfort; outdoor; wellbeing; citizen resilience to climate change.

1. Introduction

In recent history, innumerable events took place and have had a strong impact on a global level. Among the most evident effects of these phenomena, urbanization and expansion of metropolitan areas are those that have had greater diffusion, affecting a wide range of fields of study, to the point of causing non-negligible environmental alterations. The presence of a strongly anthropized and constantly growing context, causes climatic changes not only in the urban area but also in the surrounding ones, and often occur through the Urban Heat Island phenomenon [1].

Causes, effects and mitigation strategies of this phenomenon, described for the first time in the 19th century, are at the center of numerous researches that face the problem in various aspects and

reference scales [2–4]. The growing interest towards the outdoor comfort of the citizens [5–7], pushes more and more to the microclimatic analysis of the urban areas, and leads to the development of new instruments and methodologies. It is in this context that the idea of a wearable monitoring system is inserted. This instrument allows to collect climate data in all those places not accessible by traditional monitoring mobile systems and it is able to catch the pedestrian perspective. Moreover, the adoption of mobile observational transects allow to characterize the extremely heterogeneous urban environment in all its microclimate peculiarities occurring below the Urban Canopy while these are not easily detectable through data gathered from fixed weather station networks [8] or remote sensing [9]. Following the validation of the new system, tailored designed and composed of all the sensors that make up a weather station [10], a subsequent research phase is proposed here. The monitoring campaign is composed by several steps each one referred to different scale of analysis with the final aim of deepening the knowledge of the effects of UHI in a medium-sized historical context [11]. The results obtained from this study, confirm those of previous researches, and can be used for the proposal and evaluation of specific mitigation strategies for different contexts. The answers given, together with the new questions arisen, provide useful elements for the data analysis through the cluster method, and open the way to future developments in the field of microclimatic research for the citizens' wellbeing.

2. Urban heat island in historical cities

The UHI phenomenon has been deeply investigated throughout years. Many of the studies focus on megacities or metropolitan areas. There is a great attention on high density cities and new developing areas where the heat island phenomenon is more evident and strongly related to human activities [12–14]. In fact, the main causes of the overheating are related with the anthropogenic heat release, the substitution of pervious surfaces with waterproof coating and paving and the lack of greenery. Only few studies are focused on the analysis of the historic city districts [11]. Nevertheless, these researches point out that often the Urban Heat Island is a phenomenon that affect also medium size and historic cities. Beyond the size, which is the most evident discrepancy between historic and recent cities, the differences among the contexts are synthesizable into two features, referred to the materials and the settlements localization and geometry. The ancient city centres are mainly characterized by buildings with thick stone walls and outdoor pavements of brick and slabs made of stones, with respect to the more recent urban core of metropolis or megacities made of concrete, steel, glass and a large amount of asphalted paving. Even if this massive structure gives to the heritage constructions a higher thermal mass, it does not provide a better outdoor comfort, because of the lack of greenery, often lower than in the new developed areas, which implies that all the energy fluxes are converted into sensible heat [15]. The high density of the urban agglomeration sometimes generates canyons with high values of Height/Width ratio (H/W) due to the closeness between the buildings facades. The centre compactness compromises the access of direct solar beams but traps the longwave re-emitted radiations as-well. Moreover, historical environments are considered particularly vulnerable to climate change, the thermal degradation could endanger landscapes and buildings and is necessary to, take some countermeasure [16].

Nevertheless, developed mitigation strategies such as the increase of greenery and the application of cool materials, are not always applicable in ancient contexts. The aesthetic constraints imposed by the conservation of the cultural heritage does not often allow to face the UHI and its consequences changing the skin of the historic buildings.

The cool materials must be developed to achieve the same appearance of the ancient built environment. Some studies model and assess the impact on the thermal comfort and the air temperature of materials and coatings whose reflectance is higher in the near-infrared spectral band while it maintains the same characteristics of a traditional material in the visible. Due to this property, it is possible to decide exactly the colour to match the historic envelopes [17].

A deep understanding of the relationship existing between the built environment and its microclimate can help to reduce the effect of UHI and heat waves, find suitable mitigation systems specifically tailored for each context and support a sustainable and energy efficient urban planning.

2. Case study

The purpose of this study is to achieve a thermal characterization of a selected path in the historical centre of Perugia (Italy), referring to Urban Heat Island phenomenon and how it acts on the city context at small scale. The study aims at assessing the intra-urban microclimate variation within the historical core of the city, within canyons or specific parts of the single neighbourhood.

Data collected by means of the wearable system are compared to the measurement collected by a reference weather station settled in an open area of the same city within a suburban green context.

Located on top of the hill the historical core of the city has a Medieval configuration, with variable features which depend by construction density, the height to width ratio, the presence of greenery and water bodies (Figure 1).

The construction period influences the buildings' density and therefore the aspect of the canyons. The oldest areas are characterized by narrow streets and buildings with three or four floors. More recent parts present a lower construction density, and larger streets and squares. However, buildings never have more than five floors and are characterized by massive walls made of stone slabs.

Within the area there is a lack of greenery which is concentrated only in few points as in Piazza Italia, where there are also two water bodies. Another water spot is the main square of the city centre, the Fontana Maggiore in Piazza IV Novembre.

Almost all the streets are made of slabs of "pietra serena", therefore just a small amount of the surfaces are permeable and the most of the solar radiation that reaches the floor is absorbed and released as sensible heat, increasing the air temperature near the ground. The case study area hosts mainly residences, commercial activities and offices, moreover, in all the area the vehicular circulation is allowed only to authorized people, like inhabitants or public services. In this way, the pollution and the anthropogenic heat release due to the traffic are reduced, and the citizens are less affected by these unhealthy factors.

Despite that, due to the urban configuration, it is possible to highlight the incidence of the heat island phenomenon on the air temperature. Indeed, the low Sky View Factor, the high level of mutual-reflection between surfaces and the heat absorbed by the built elements and then release as sensible

heat, the lack of greenery and water bodies, decrease the temperature fluctuation increasing the nighttime UHI.

On the other hand, during the day, the behaviour of this boundary is variable and the spatial configuration creates different conditions, mainly on the base of the amount of direct solar beams that hit the surfaces.

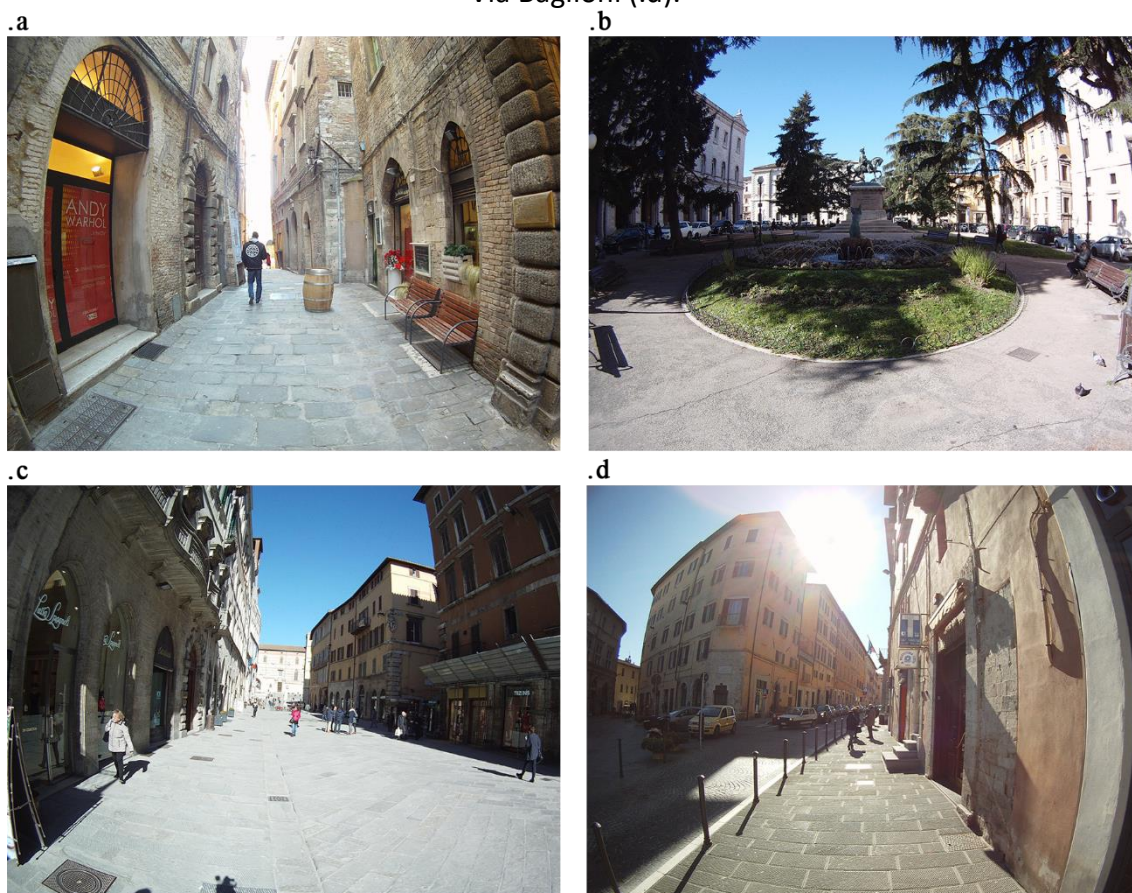
The path followed by the monitoring goes through canyons with different geometry and orientation, and squares characterized by the presence of trees or water bodies. The studied places are mainly urban canyons with different orientations. The most important ones are Corso Vannucci (Figure 2.c), a pedestrian street where the traffic is allowed only for the authorized vehicles, and via Baglioni (Figure 2.d), the second widest road of the area. Various small canyons as via Danzetta (Figure 2.a), via Bonazzi and via Fani, and the main opened areas as Piazza Italia (Figure 2.d) and Piazza IV Novembre are also monitored.

To assess the effects of the identified different configurations on local microclimatic conditions, the monitoring path is repeated three times with the maximum of solar radiation, and other three times without radiation, i.e. after the sunset.

Figure 1. 3D view of the Urban Historic Area, where the blue line represents the monitored path.



Figure 2. Survey's pictures taken in via Danzetta (.a), Piazza Italia (.b), Corso Vannucci (.c) and Via Baglioni (.d).



3. The wearable instrument: development, hardware and software

The understanding of the UHI phenomenon, how and how much it is influenced by the structure of the different built environments is fundamental to identify suitable mitigation strategies. To this purpose is needed a detailed climatic data collection, at small-scale and from the pedestrian perspective, to assess the microclimate variations, and the effects on the citizens wellbeing.

The most common experimental methodologies are based on data collected by means of remote sensing [18], network of permanent weather stations [19] and mobile monitoring with instruments fixed over vehicles [20]. These strategies allow to evaluate the urban thermal pattern and understand the strong correlation between heat island intensity and spatial configuration of the studied areas, taking in account the land use and land cover, the amount of pervious and waterproof surfaces, the presence of water bodies or greenery.

Nevertheless, these are characterized by a low representation accuracy of site-specific ground surfaces features. Moreover, network of permanent weather stations may give a limited number of monitoring spots, and presents sparse and location-dependent measurements. The data collected by means mobile station settled over vehicles, could be more detailed but are referred only to roadways and parking, while pedestrian areas of the urban context cannot be investigated with these systems.

With the aim to improve the monitoring strategies, within the academic framework of the University of Perugia, the CIRIAF researchers developed a new wearable device (Figure 3), composed of a miniaturized weather station that can record microclimate parameters as air temperature, relative humidity and wind speed and direction. Moreover, air quality components as CO, CO₂ and VOC, and geographical references as longitude, latitude, and elevations are collected [10].

This system is characterized by relatively small size and light weight, that allow to settle it on helmet or backpack. Therefore, the station is a wearable system tailored to monitor the places that are not accessible for the common vehicles and to record the environmental data from the pedestrian perspective. The developed device is designed to carry out a multi-physics analysis of the environment within the urban or suburban areas, by the pedestrian perspective.

Figure 3. Survey's new wearable monitoring system views.



To have a detailed representation of the environmental microclimate of each area, the sensors embedded in the device collect every parameter that characterized the climate conditions, the air quality and the geographical references simultaneously every 2 seconds.

4. Results

UHI's assessment in the historic centre of Perugia (Figure 4) gives back specific findings due to the specific features that affect these places' thermal behaviour, i.e. construction density, materials and amount of vehicular traffic.

The recorded differences are referred to intensity and fluctuation of the UHI, with a wider range and a partial reverse trend. Indeed, having a look to the gradients measured during whole monitoring, these show a range of 4 °C, with values from -1 °C to 3 °C.

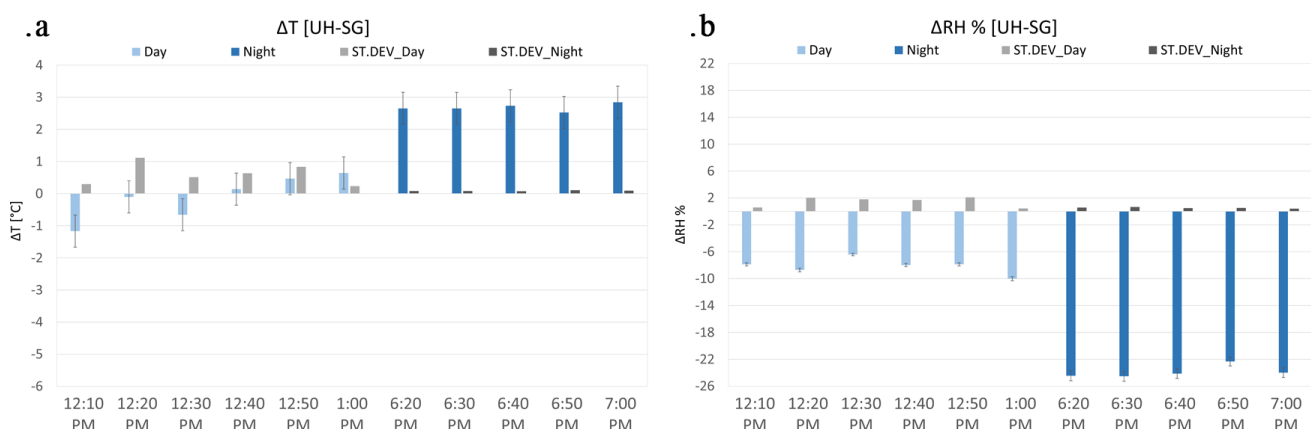
More in detail, the daytime UHI's trend highlights the phenomenon's inversion. The first phase of monitoring displays negative differences between collected data and reference ones. In the first half an hour, the historic city centre is cooler than the reference, since the construction density decreases the amount of solar radiation that reaches the ground, slowing the air heating. Subsequently, air temperature rises, and the difference become positive continuously growing up to the maximum value collected at the end of the monitoring campaign, i.e. 0.65 °C at 1:00 pm. These findings highlight the effective temporal dependency of collected air temperature values.

During the night, the air temperature recorded into the Historic Urban Area is some degrees higher than in the suburban green area due to the UHI's presence. The differences measured are around 2.5 °C with small fluctuations that tend to increase with the time, reaching the maximum collected value 2.85 °C at 7:00 pm.

Even in this path, the standard deviation allows to evaluate the highest variability of temperatures in daytime, i.e. from 8 °C to 12.3 °C, than in nighttime, when it is close to the zero. These results (Figure 5.2.a) explain clearly the strong relation between the temperature and the construction density within the urban context.

The comparison among the relative humidity's data collected during the monitoring campaign and the reference (Figure 5.2.b), demonstrates that the levels within the city centre are smaller than in the suburbs, and also that relative humidity does not increase in both areas at night. While the reference data increase from 55% to more than 70%, in the city centre the relative humidity remains constant, between 45 ± 50 %.

Figure 4. Air temperature (.a) and relative humidity (.b) differences between data collected by the wearable station in the Urban Historic Area and the reference weather station. The standard deviation shows the values' variability around the computed 10-minutes average.



5. Conclusions and mitigation potential

The study carried out in the historic centre has shown that the presence of the UHI is relevant above all during the night, i.e. temperature increase of about 3°C, while during the day there are no important discrepancies between monitored data and reference ones. In this context, the interaction between

solar radiation and building density has proved to be fundamental in conditioning the thermal behaviour of each area. The cluster analysis explains well this phenomenon, underlining that in the transects most exposed to radiation, the highest temperature values are recorded, i.e. 11.63 °C, 11.47 °C and 10.91 °C. Furthermore, the study in the absence of radiation highlights the attenuation of the differences between individual zones, and the high intensity of UHI, in the whole context.

Since the studied area is characterized by an important historical heritage, the mitigation strategies of the phenomenon must face aesthetic constraints. However, some solutions can be adapted to the context, and compensate for the difficult implementation of other strategies. In particular, technologies on which are based the cool materials, can be developed, with the aim of producing new ones with aesthetic features accepted by the standards of building regulations. In this way, entire surfaces can be replaced, and the amount of energy absorbed during the day and released at night, is reduced.

References

1. Oke, T.R. The urban energy balance. *Prog. Phys. Geogr.* **1988**, *12*, 471–508.
2. Nyuk Hien, W. Urban heat island research: Challenges and potential. *Front. Archit. Res.* **2016**, *5*, 276–278.
3. Akbari, H.; Kolokotsa, D. Three decades of urban heat islands and mitigation technologies research. *Energy Build.* **2016**, *133*, 834–852.
4. Gago, E.J.; Roldan, J.; Pacheco-Torres, R.; Ordóñez, J. The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2013**, *25*, 749–758.
5. Taleghani, M.; Kleerekoper, L.; Tenpierik, M.; Van Den Dobbelsteen, A. Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands. *Build. Environ.* **2015**, *83*, 65–78.
6. Piselli, C.; Castaldo, V.L.; Pigliautile, I.; Pisello, A.L.; Cotana, F. Outdoor comfort conditions in urban areas: On citizens' perspective about microclimate mitigation of urban transit areas. *Sustain. Cities Soc.* **2018**, *39*.
7. Moonen, P.; Defraeye, T.; Dorer, V.; Blocken, B.; Carmeliet, J. Urban Physics: Effect of the microclimate on comfort, health and energy demand. *Front. Archit. Res.* **2012**, *1*, 197–228.
8. Paolini, R.; Antretter, F.; Cotana, F.; Pisello, A.L.; MeshkinKiya, M.; Zani, A.; Poli, T.; Castaldo, V.L. The hygrothermal performance of residential buildings at urban and rural sites: Sensible and latent energy loads and indoor environmental conditions. *Energy Build.* **2016**, *152*, 792–803.
9. Geiger, R. *The Climate Near the Ground*; Harvard University Press, 1950; ISBN 1111111111.
10. Pigliautile, I.; Pisello, A.L. A new wearable monitoring system for investigating pedestrians' environmental conditions: Development of the experimental tool and start-up findings. *Sci. Total Environ.* **2018**, *630*.
11. Castaldo, V.L.; Pisello, A.L.; Pigliautile, I.; Piselli, C.; Cotana, F. Microclimate and air quality investigation in historic hilly urban areas: Experimental and numerical investigation in central Italy. *Sustain. Cities Soc.* **2017**, *33*.
12. Yue, W.; Liu, X.; Zhou, Y.; Liu, Y. Impacts of urban configuration on urban heat island: An empirical study in China mega-cities. *Sci. Total Environ.* **2019**, *671*, 1036–1046.

13. Yadav, N.; Sharma, C. Spatial variations of intra-city urban heat island in megacity Delhi. *Sustain. Cities Soc.* **2018**, *37*, 298–306.
14. Zhao, C.; Jensen, J.; Weng, Q.; Currit, N.; Weaver, R. Application of airborne remote sensing data on mapping local climate zones: Cases of three metropolitan areas of Texas, U.S. *Comput. Environ. Urban Syst.* **2019**, *74*, 175–193.
15. Rosso, F.; Golasi, I.; Castaldo, V.L.; Piselli, C.; Pisello, A.L.; Salata, F.; Ferrero, M.; Cotana, F.; de Lieto Vollaro, A. On the impact of innovative materials on outdoor thermal comfort of pedestrians in historical urban canyons. *Renew. Energy* **2018**, *118*.
16. Santamouris, M.; Cartalis, C.; Synnefa, A. Local urban warming, possible impacts and a resilience plan to climate change for the historical center of Athens, Greece. *Sustain. Cities Soc.* **2015**, *19*, 281–291.
17. Castaldo, V.L.; Rosso, F.; Golasi, I.; Piselli, C.; Salata, F.; Pisello, A.L.; Ferrero, M.; Cotana, F.; De Lieto Vollaro, A. Thermal comfort in the historical urban canyon: The effect of innovative materials. In *Proceedings of the Energy Procedia*; 2017; Vol. 134, pp. 151–160.
18. Aniello, C.; Morgan, K.; Busbey, A.; Newland, L. Mapping micro-urban heat islands using LANDSAT TM and a GIS. *Comput. Geosci.* **1995**, *21*.
19. Cui, Y.; Yan, D.; Hong, T.; Ma, J. Temporal and spatial characteristics of the urban heat island in Beijing and the impact on building design and energy performance. *Energy* **2017**, *130*, 286–297.
20. Hab, K.; Middel, A.; Ruddell, B.L.; Hagen, H. TraVis - A visualization framework for mobile transect data sets in an urban microclimate context. *IEEE Pacific Vis. Symp.* **2015**, 2015–July, 167–174.

XIX Congresso Nazionale CIRIAF

Energia e Sviluppo Sostenibile

An overview on experimental investigations for thermal characterization of building walls

Francesco Asdrubali ^{1,*}, Luca Evangelisti ¹, Claudia Guattari ¹, Gino Moncada Lo Giudice²

¹ Roma TRE University, Department of Engineering, Via Vito Volterra 62, 00146, Rome, IT, Italy

² Sapienza University of Rome, Department of Astronautical, Electrical and Energy Engineering, Via Eudossiana, 18, 00184 Rome, IT, Italy

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: francesco.asdrubali@uniroma3.it

Abstract: It is well known that the behavior of walls in buildings highly influences annual energy needs. The dynamic characterization of a multilayer wall can be performed by defining its stratigraphy and the thermo-physical parameters of each layer. When existing buildings are investigated, technical specifications may be unknown or difficult to obtain due to documents lost over time; furthermore, aging may have altered the building materials characteristics. In these cases, in situ measurements become essential but there is the need to analyze the behavior of walls considering their dynamic characteristics. On the other hand, Standards related to the building thermal behavior can help engineers or technicians to define some unknown information related to heat transfer coefficients and thermo-physical properties. But, how can these suggestions be considered reliable in every situation? This paper tries to answer to this question, summarizing some experimental investigations conducted by the Authors.

Keywords: Building performance; in situ measurements; thermal properties; thermal transmittance, convective coefficients.

1. Introduction

Energy efficiency in the building sector is considered a key action in order to achieve sustainable development goals and reduce greenhouse gas emissions [1].

Since many years, buildings energy diagnosis is a very critical issue treated by several international studies [2,3,4,5]. In Italy the European Directive is applied through the Decree n.192. It issues criteria and conditions to improve buildings energy performance to endorse development, enhancement and integration of renewable energy sources and to contribute to achieve national goals to reduce greenhouse gases emissions [6].

In Italy the energy requirement of the building sector is about 40% of the national energy consumption: an efficient design of buildings and plants can be the key to deal with the abovementioned issues [7]. The design starts from the assessment of buildings heat losses and of the annual thermal loads and in Italy these analyses are based on the UNI TS 11300 requirements [8]. These standards require an energy analysis under steady-state condition, or a simplified procedure that is not able to accurately analyze real conditions. On the contrary, high-performance standards of buildings, such as NZEB, require dynamic and accurate simulations.

During the last years, some practical issues were investigated by the Authors:

- many correlations were developed in scientific literature to quantify the convective heat transfer coefficient, distinguishing similarity based and experimentally ones. The actual total internal heat transfer coefficients in different case studies were obtained by measuring the physical parameters that are needed to define them. Convective and radiative contributions were separately evaluated and, finally, actual convective heat transfer coefficients were compared with the same coefficients obtained by applying the correlations available in the literature and with the constant values suggested by the Standard;
- thermal resistance measurements of walls are based on 1D models but internal heat sources cause a deviation from one-dimensional conditions. For this reason, a FEM code was employed to reproduce the heat-flow meter method within a 2D model. In this study, walls including an internal pipe, inside which hot/cold water flows, were studied. Models were generated considering different stratigraphies and heat-flow plate positions along the inner side of the wall, in order to reproduce the thermal conditions that affect the flowmeter and the wall, respectively. Thus, it was possible to compare the thermal resistances of the different walls and to find the best heat-flow plate positions in order to minimize the influence of the internal heat source;
- the actual total external heat transfer coefficients in different case studies were obtained by measuring the physical parameters needed to define them. Peculiar geometries, i.e. balconies and porticos, were addressed, for which specific correlations are not available in the literature. Convective and radiative components were distinctly assessed and, finally, actual convective heat transfer coefficients were compared with the same coefficients obtained by applying the conventional correlations available in the literature and with the constant values suggested by the Standard;
- when existing buildings are investigated, technical details as far as stratigraphy may be unknown and for this reason, it was verified if an equivalent homogeneous wall can be associated to a multilayer wall in the sense of producing the same behavior if exposed to the same outdoor environmental conditions. Findings in literature demonstrate that, generally, this is not exactly achievable. However, the possibility of an approximate equivalence was investigated by means of finite-element simulations and experimental measurements;
- on-site measurements are essential but the boundary conditions during surveys can affect the results. This can occur during heat flow meter measurements, when the thermal transmittance value of a wall can be influenced by disturbing factors, such as the heating system power-on and off. For this reason, a data post-processing procedure was proposed as a new supplementary approach able to exclude heat flow distortions and able to obtain measured U-values closer to the calculated ones, according to ISO 6946.

The final aim of this paper is to try to understand if the suggestions provided by the Standards, regarding building thermal behavior, can be considered representative of the actual conditions in existing buildings. In particular, some experimental investigations conducted by the Authors were summarized.

2. Materials and methods

The experiences conducted by the Authors regard different experimental set up with different specific aims. The common goal of these research is the thermal characterization of a building wall, even if the stratigraphy is unknown or disturbance phenomena are present, in order to carry out all the measurements campaigns a heat flow meter, air temperature probes and surface temperature probes were employed.

The in situ measurements were carried out for more than 72 h and the acquired data were processed, in compliance with the specifications provided by the Standard UNI 9869 [8].

3. Experimental campaigns results and discussion

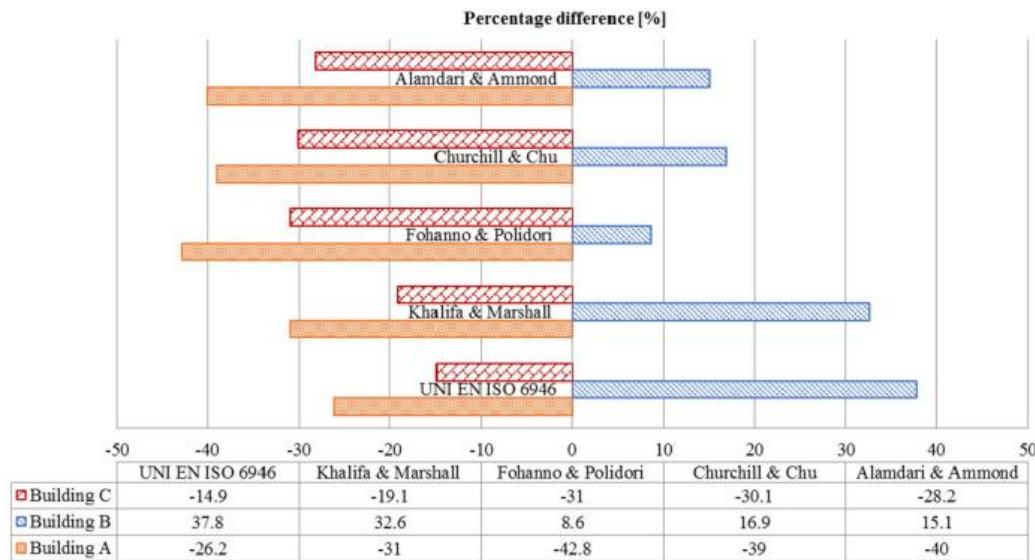
3.1 Convective heat transfer coefficient evaluation

Thermal transmittance measurements were conducted in the chosen buildings and the data acquired by using the heat-flow meter and the surface temperature probes were processed in order to evaluate radiative and convective heat transfers [9]. Measurements were conducted during the winter in order to ensure a high temperature difference between the internal and external environment.

Surface convective and radiative heat transfer influence thermal transmittance and, consequently, building energy consumption. Starting from this, the need to correctly assign convective heat transfer coefficient values for the thermal transmittance evaluation was highlighted. Taking into account the several correlations found in literature, which were obtained in very different ways, and the need to adopt a convective heat transfer coefficient to evaluate the U-value, the influence of the h coefficient on the thermal transmittance final value was investigated.

Often, instruments software interface allows changing the measurement settings and this occurs when the heat flow meter is equipped with surface temperature probes. In particular, the heat flow meter allows changing the assigned total heat transfer coefficient value but, practically, it is quite hard to choose a specific one, moving away from the Standard suggestion. The influence of different convective heat transfer coefficient values calculated by means of different models, on thermal transmittance evaluation was explored, by using both similarity-based and experimentally based correlations. Analyzing the results, it can be noticed that the similarity-based correlations allow obtaining convective coefficients values significantly different from the constant one provided by the Standard (Fig.1). On the contrary, considering the experimentally based correlation for natural convection, it is possible to observe consistent values with the Standard. On the other hand, in all case studies, radiative coefficients obtained by using surface temperatures are very close to the constant value suggested by the Standard, with an average percentage difference equal to 3.2%.

Figure 1. Percentage differences between U-values obtained through the heat flow plate method and other approaches.



3.2 Effects of internal heat sources on thermal transmittance value

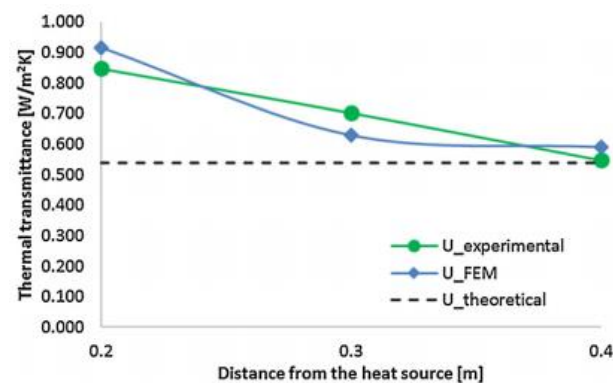
The effects of thermal field distortions caused by the presence of a pipe (containing hot/cold water) inside walls were investigated by reproducing the thermal behaviors of various walls through a FEM simulation code [10]. Models were generated considering different wall stratigraphies and different heat flow plate positions along the inner side of the wall, to reproduce the thermal conditions that affect the flow-meter plate and the wall. Moreover, heat fluxes components along the inner side of the wall were investigated to identify the best position for installing the heat flow plate. Six different walls were reproduced, considering different masonries, made of homogeneous materials, hollow bricks, insulating materials and air gaps. Furthermore, different water temperatures inside the pipes were considered.

Analyzing different stratigraphies, thermal fields inside the walls are characterized by distortions whose extension can reach even about 1.3 m from the internal pipe. This occurs when masonries are made of homogenous materials on the inner side characterized by high thermal conductivities, such as solid bricks made of rocks or concrete, with water temperature inside the pipe equal to 70 °C. The thermal conductivity of the main layer can affect the safe distance.

When the stratigraphy is characterized by two homogenous identical layers divided by an air gap, the influence of the thermal conductivities is less evident, with safe distances (for the same pipe temperature) that may differ slightly. Taking into account inhomogeneous elements, such as hollow bricks, for the same water temperature condition, this height changes if the outer layer is made of homogeneous materials or if it is made of hollow bricks. In the first case, the safe distances range from 0.98 m to 1.05 m; in the second case, the limit distances range between 0.75 m and 0.82 m. However, safe distances can be reduced when the air gap is filled with an insulating material.

Different building materials were considered by changing thermal conductivity and thus a summary chart of several building stratigraphies, representative of the time period 1900/1975, was obtained. This chart could be used to identify the best heat flow plate position during in-situ measurements when the position of a pipe is known (the position can be identified by employing a thermal imaging camera). It is worth noticing that the Standard suggests avoiding proximity to such particular points as thermal bridges, but it does not give specific recommendations concerning internal heat sources. The analysis of the influence of these heat sources is important in order to correctly estimate walls thermal resistances, with undeniable implications on building labelling procedures and building energy audits. Finally, in order to preliminarily validate the FEM analyses and to evaluate the influence of an internal hot water pipe on the heat flow meter method results, in situ measurements were performed. The experimental measurements carried out at different distances from a known fan-coil supply pipe allowed to comprehend that an undetected heat source can significantly affect the measurements, providing an overestimation of the R-value than can be higher than 50%. The safe distance resulting from the FEM simulation is in good agreement with the experimental results obtained from the real case study.

Figure 2. Measured, simulated and theoretical thermal transmittances as a function of the distance from the pipe.



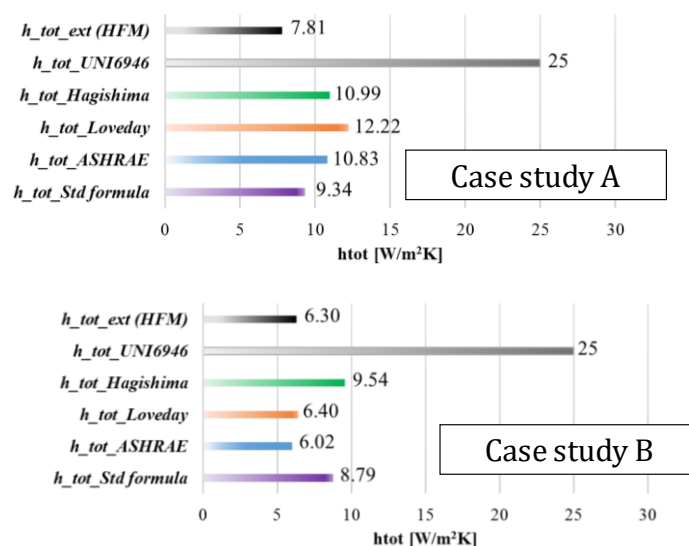
3.3 Total external heat transfer coefficients evaluation

This work aimed at studying heat transfer processes between building walls and environment using in-situ measurements, existing correlations dependent on wind speed, Standard recommendations and an empirical methodology. Currently, specific correlations are not available in literature for architectural geometries such as balconies and porticos, even though buildings envelopes become increasingly complex. Two characteristic case studies were analyzed considering different buildings placed in Rome (Case Study A) and Perugia (Case Study B). On site measurements were performed and convective and radiative components were distinctly assessed. Total heat transfer coefficients were also estimated from temperature and HFM measurements and compared with the same coefficients obtained by using the correlations available in literature and with the constant value suggested by the Standard. In addition, the empirical method, related to the dimensionless numbers approach, was applied to evaluate the external convective heat transfer coefficients [11].

For both case studies, the radiative heat transfer coefficient was evaluated applying: firstly, the only surface temperatures; secondly, the mean value obtained by the surface and the air temperatures and thirdly, the only external air temperature. The obtained percentage differences (ranging between 0.85% and 2.6%) can be considered negligible and this circumstance allows to use a lower number of probes, meeting the needs of users with a limited instrumentation. The analysis of the total heat transfer coefficients shows that the most significant differences are based on the quantification of convective heat transfer phenomena. By employing the same correlations to different case studies, it is possible to observe scattered results. Applying the correlations with the dimensionless numbers, it is possible to observe $h_{c,ext}$ characterized by the lowest values, with small oscillations in both case studies. Considering the h_{tot} obtained by the heat flux density measurements in Case Study A, it is possible to notice that, if the expressions that make use of the wind speed are used, the best approximation can be achieved by applying the equation suggested by the Standard for the convective contributions (the achieved percentage difference is equal to 26.5%) but using local wind speed measurements instead of any other average value, such as the closest airport data. This can be explained by the fact that it is impossible to assume a similarity between developed external air flows, outside the atmospheric boundary layer, and the sheltered conditions that characterize the analyzed situation. Regarding Case Study B, the best approximation, in terms of total heat transfer coefficient, was given by using the ASHRAE correlation, with a percentage difference equal to 13.4%.

More in general it is possible to observe that, by using local wind speed values, the obtained results in terms of $h_{c,ext}$ are significantly spread out as a function of the different applied correlations (Fig. 3). UNI EN ISO 6946 suggests a constant value ($25\text{W/m}^2\text{K}$) widely used by technicians for practical applications, independently of actual boundary conditions. In both our case studies, such constant value provided a large overestimation of $h_{c,ext}$. Indeed, in both situations the local wind speed was quite low, as the surfaces that were selected for this study were clearly not exposed to the fully developed external air flow. A much more satisfactory agreement with the h_{tot} resulting by the heat flux density measurements is obtained when applying the empirical method, due to its phenomenological approach that makes it much closer to the actual thermo-fluid dynamics conditions.

Figure 3. Total heat transfer coefficients average values.



3.4 Equivalent thermal properties evaluation and their reliability

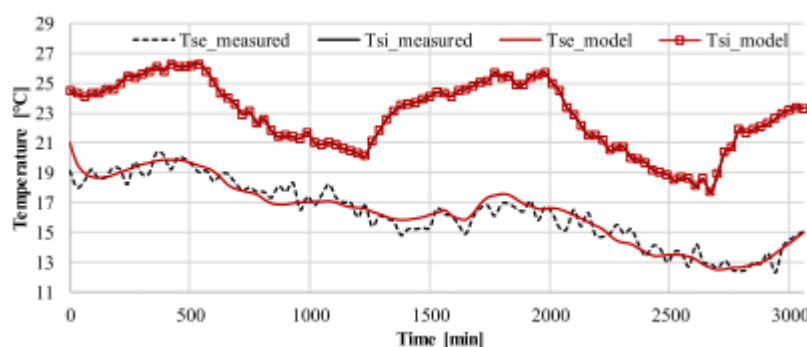
When existing buildings are inspected during an energy retrofit phase, technical data may be unknown or difficult to obtain because documents could be lost over time or structural modifications could have altered the building composition. The possibility of describing multilayer walls by means of equivalent homogeneous ones and of finding equivalent thermal properties could solve problems related to the lack of significant technical information, in order to achieve the walls dynamic characterization, crucial to set up a proper energy simulation model and to achieve a better coupling between the building and the heating/cooling system, avoiding air-conditioning systems oversizing, reducing emissions and environmental impact.

For these reasons, by using a FEM simulation code, a preliminary investigation was carried out to verify the possibility of reproducing the thermal behavior of different multilayer walls by means of equivalent representations, made of a single homogeneous layer [12]. It is worthy to notice that, imposing different equivalent thermo-physical properties, several calibrated models (according to the ASHRAE criteria) can be obtained. Nevertheless, starting from comparable calibration rates but also considering the EF index, the model that better approximates the real wall behavior can be identified.

Moreover, two actual walls were investigated, employing the FEM code and in situ measurements, for the real boundary conditions representation. In order to calibrate the numerical model, a known stratigraphy (Case 1) was reproduced starting from the available data and measurements were conducted for obtaining information about the wall thermal behavior. Then, to preliminarily validate the described procedure, the model was applied to an unknown stratigraphy (Case 2). For both the case studies, very good equivalent representations were found (Fig. 4), characterized by EF indexes equal to 0.92 and 0.93, respectively.

In synthesis, the proposed methodology consists in the application of an iterative approach for the determination of just two equivalent thermo-physical parameters, those that describe the equivalent homogeneous wall, starting from measured data, such as surface temperatures, heat fluxes, air temperatures and velocity.

Figure 4. Measured internal and external surface temperatures compared with the ones obtained through the FEM model.



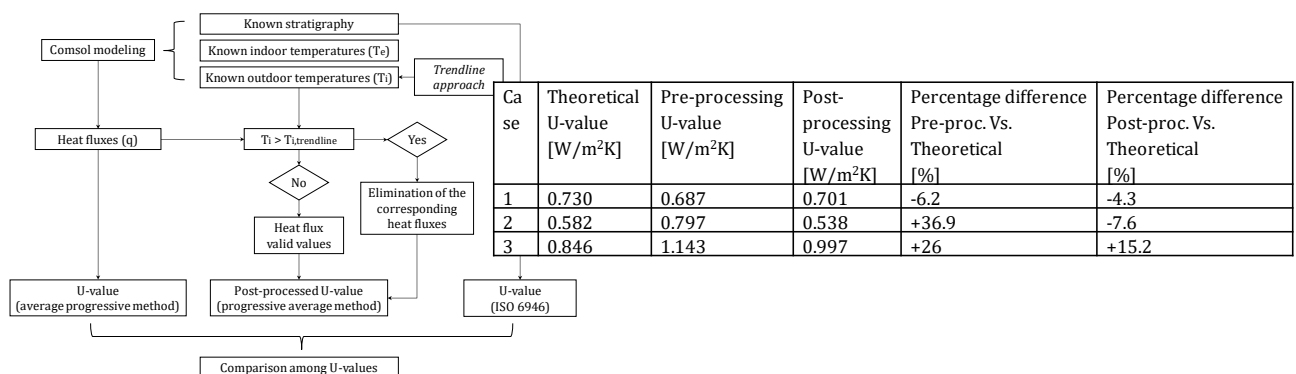
3.5 Thermal transmittance evaluation and disturbance phenomena

The energy analysis of existing constructions is very important for achieving energy savings in the building sector and the comprehension of the actual performance goes through on-site measurements and monitoring. Starting from this, non-destructive tests (such as the heat flow meter method) are often employed but the obtained data can be influenced by disturbing factors. This can happen during heat flow meter measurements, when the thermal transmittance value of a wall can be influenced by the heating system powers-on. For this reason, simulations and experimental measurements were carried out for investigating these effects [13].

The true uncertainty is represented by suitable measurement conditions and therefore the uncertainty is on heat flows. However, steady-state conditions are almost impossible to maintain, especially in residential buildings, where centralized heating systems are installed. In order to properly analyze data, a first examination and selection is needed to begin the consequent postprocessing step. Reasoning on data and their consistency is a key part of the instrument survey but, on the other hand, the role of the user becomes fundamental. For this reason, a new simple method was proposed, based on a methodological approach which can help users in analyzing data in a consistent way. Starting from simulations and on-site measurements, the proposed “trendline” approach was preliminary verified, investigating case studies characterized by heating systems with radiators and obtaining preliminary satisfying results. The simulations allowed to preliminary verify the proposed method obtaining a reduction in the percentage difference between the measured and the calculated U-value that goes from +22.1% to +0.7%. Considering the actual case studies, the best improvement was achieved in Case 2, with a percentage deviation ranging from +36.9% to -7.6%. In Case 3, the difference ranges from +26% to 15.6% and in Case 1 it ranges from -6.2% to -4.3% (Fig.5).

Starting from this preliminary validation, the proposed procedure seems to be promising with thermal transmittance corrections in accordance with the theoretical values. Moreover, future developments of this study will regard the case of cooling and intermediate season, when the heating/cooling systems are both used, and testing this method under laboratory conditions.

Figure 5. Application of the proposed methodological approach to real case studies.



4. Conclusions

This paper focuses on various heat transfer processes which occur in buildings: the convective and radiative heat exchanges between the exterior building surfaces and the external environment, the internal convective heat transfer coefficient evaluation, the study of the equivalent thermal properties of building walls and the thermal transmittance value assessment when disturbance phenomena are present. The knowledge about these coefficients is fundamental for a correct evaluation of buildings thermal behavior, especially when a refurbishment of an existing building is proposed in order to achieve a NZEB standard and a dynamic simulation is performed.

It is well known that surface convective and radiative heat transfer influence thermal transmittance and therefore building energy consumption. Starting from this, the necessity to properly assign convective heat transfer coefficient values for the thermal transmittance evaluation was highlighted.

The experimental investigations aimed at highlighting heat transfer processes among building walls and the internal and external environment through different in situ measurements campaigns, also when the stratigraphy is unknown, by comparing experimental results, existing correlations and Standard suggestions. Then, different case studies were analyzed considering different locations of the buildings and stratigraphy characteristics. On site measurements were performed and convective and radiative components were distinctly assessed. Finally, actual convective heat transfer coefficients were compared with the same coefficients obtained by using the correlations available in the literature and with the constant value suggested by the Standard.

Thermal transmittance differences have a crucial role for the determination of the seasonal energy needs and consequently for the building energy labeling procedures. Considering the current simplified processes used to calculate building energy performance and based on quasi-stationary approach, using constant values is surely convenient, but the values suggested by the Standard are not automatically representative of actual heat transfers phenomena between environment (internal or external) and walls.

References

- [1] European Directive 2002/91/CE 16 December 2002 Regarding Buildings Energy Performance.
- [2] Dounis A.I.; Caraiscos C. Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment—A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2009**, 13, 1246–1261.
- [3] Na Z.; Zhenjun M.; Shengwei W. Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: A review, *Energy Conversion and Management* **2009**, 50, 3169–3181.
- [4] Garcia Casals X. Analysis of building energy regulation and certification in Europe: Their role, limitations and differences, *Energy and Buildings* **2006**, 38, 381–392.
- [5] Perez-Lombard L.; Ortiz, Rocio Gonzalez J.; Maestre I.R. A review of benchmarking, rating and labelling concepts within the framework of building energy certification schemes, *Energy and Buildings* **2009**, 41, 272–278.
- [6] Legislative Decree 19 August 2005, n. 192.

- [7] 11300.cti2000.it, Certificazione energetica degli edifici – EPBD.
- [8] ISO 9869 - Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance.
- [9] Evangelisti L.; Guattari C.; Gori P.; De Lieto Vollaro R.; Asdrubali F. Experimental investigation of the influence of convective and radiative heat transfers on thermal transmittance measurements, *International Communications in Heat and Mass Transfer* **2016**, 78, 214-223.
- [10] Guattari C.; Evangelisti L.; Gori P.; Asdrubali F. Influence of internal heat sources on thermal resistance evaluation through the heat flow meter method, *Energy and Buildings* **2017**, 135, 187–200.
- [11] Evangelisti L.; Guattari C.; Gori P.; Bianchi F. Heat transfer study of external convective and radiative coefficients for building applications, *Energy and Buildings* **2017**, 151, 429-438.
- [12] Evangelisti L.; Guattari C.; Gori P.; Asdrubali F. Assessment of equivalent thermal properties of multilayer building walls coupling simulations and experimental measurements, *Building and Environment* **2018**, 127, 77-85.
- [13] Evangelisti L.; Guattari C.; Asdrubali F. Influence of heating systems on thermal transmittance evaluations: Simulations, experimental measurements and data post-processing, *Energy and Buildings* **2018**, 168, 180-190.

XIX Congresso Nazionale CIRIAF

Energia e Sviluppo Sostenibile

Experimental analysis and optimization of outdoor curtain materials for solar protection as a solution for urban heat island mitigation and thermal comfort improvement

Marta Cardinali^{1,*}, Alberto Maria Gambelli¹, Cristina Piselli¹, Mirko Filipponi^{1,2}, Beatrice Castellani^{1,2}, Andrea Nicolini^{1,2}, Federico Rossi^{1,2}

¹ CIRIAF, Interuniversity Research Centre, University of Perugia, Via G. Duranti 63, 06125 Perugia, Italy

² Department of Engineering, University of Perugia, Via G. Duranti 67, 06125 Perugia, Italy

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: cardinali@crbnet.it

Abstract: Urban Heat Island (UHI) is a growing phenomenon taking place in dense urban environments and it is due to the lack of green areas and to the presence of built surfaces, which are typically characterized by low solar reflectance and high infrared emissivity. Furthermore, UHI is exacerbated by the Urban Heat Canyon configuration and Inter-Building effect, consisting in multiple reflections of the solar radiation, which remains entrapped inside the urban canyon. For that reason, built surfaces have a great potential in urban microclimate enhancement and UHI mitigation, particularly through the improvement of materials' solar reflectance and thermal emissivity properties. In this context, outdoor tensile structures, such as curtains and awnings, could represent an effective way for UHI mitigation and human thermal comfort enhancement, through the selection of materials with high solar reflectance on the external side of the curtain and low infrared emittance downwards. The present work is focused on the characterization of a novel glass fibre-based material for outdoor curtains and awnings in terms of solar reflectance, thermal emittance and angular reflectivity. Findings show that the tested material reveals a good solar reflectance, while a high thermal emittance has been detected. For what concerns directional reflectivity, all samples present a retro-reflective trend for incident light angles near the perpendicular, while a specular tendency occurs for incident light directions near the horizontal.

Keywords: Urban Heat Island; Microclimate Mitigation; Retro-Reflectivity; Thermal Emittance; Outdoor Human Thermal Comfort.

1. Introduction

Nowadays cities play an important role in ensuring good human well-being in terms of outdoor thermo-hygrometric comfort conditions. The continuous urbanization and the growth of population [1] results in the expansion of the built environment and in the lack of green and permeable surfaces in cities, leading to the increase of urban air temperatures compared to the surrounding rural areas. This condition is called the Urban Heat Island (UHI) phenomenon [2] and it mainly depends on solar reflectance capability and emissivity properties of urban surfaces, such as building envelope and paving materials. Furthermore, UHI could be exacerbated by the Urban Heat Canyon configuration and Inter-Building effect, consisting in multiple reflection of the solar radiation within the urban environment. As a consequence, high-density urban areas are characterised by lower wind speed, higher air temperatures and mean radiant temperatures, and such parameters mainly affect human outdoor thermal comfort [3].

For that reason, built surfaces have a great potential in the mitigation of Urban Heat Island phenomenon, particularly through the improvement of materials' solar reflectance and thermal emissivity properties. There are lots of already widely known microclimate mitigation strategies [4], e.g. cool roofs and pavements, green roofs, thermochromics materials [5] and, finally, retro-reflective (RR) materials [6]. For what concerns cool roofs and cool pavements, such microclimate mitigation strategies involve the improvement of surface's solar reflectance, while benefits derived from the application of green roofs are due to the evapotranspiration provided by greenery.

Moreover, retro-reflectivity is referred to materials which are able to reflect the incoming solar radiation mainly towards the direction of the incident beam [7,8], and such ability makes them particularly effective in Urban Canyon configurations, as they contribute to counteract UHI effect, especially in summer conditions. In this panorama, the choice of suitable materials for external built surfaces, as e.g. external curtains and awnings, is a fundamental issue for the mitigation of UHI effect and for enhancing occupants' outdoor thermal comfort in dense urban contexts.

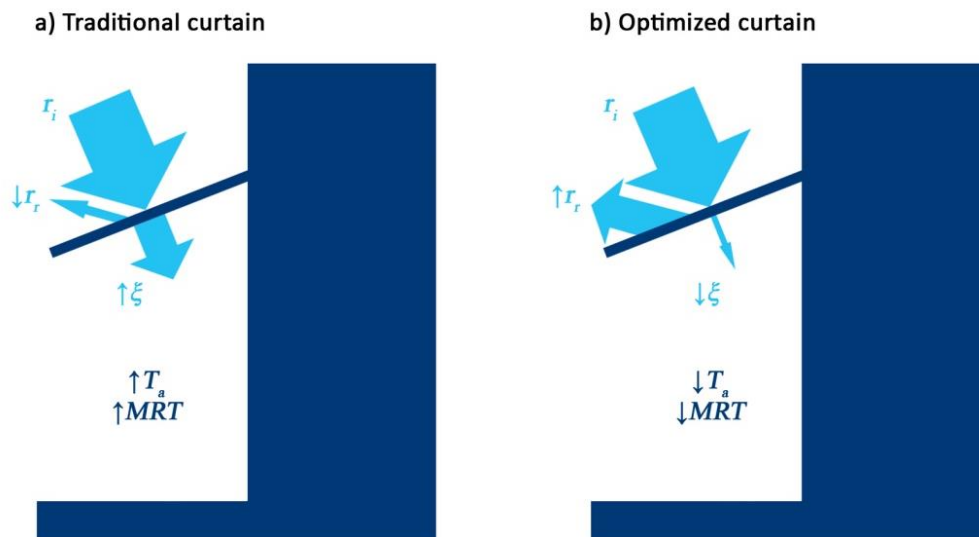
2. Motivation

In this panorama, the present paper is aimed at studying the solar and radiant properties of a novel textile material for outdoor curtain applications, in order to define its suitability for ensuring human thermal comfort conditions under the coverings.

The need to investigate outdoor shadings, as e.g. tensile structures and curtains, comes from the fact that external built surfaces have a great potential in urban microclimate enhancement and UHI mitigation, especially in summer conditions. This is due to solar reflectance (r_i) and emissivity (ξ) properties of outdoor surfaces, which may have an impact on thermal comfort parameters, such as air temperature (T_a) and mean radiant temperature (MRT), as shown in Figure 1a and 1b.

For this purpose, the present research is focused on the study of solar, thermal and retro-reflective properties of an innovative glass fibre-based material for outdoor curtains and awnings, in order to propose possible optimized solutions for ensuring better human thermal comfort conditions under the coverings.

Figure 1. a. *Traditional curtain*, with low external solar reflectance and high emittance downwards; b. *Optimized curtain*, with high external solar reflectance and low emittance downwards.



3. Methodology

In a first step of the research, a novel, glass fibre-based material was chosen as a modular solution for outdoor curtains and tensile structures for solar protection. The tested material samples consist in yarn-oriented panels in which the glass fibres are covered with resins, which ensure an excellent resistance to fire.

Four samples of white glass-fibre material have been investigated in terms of thermal emittance, spectral reflectance and retro-reflective properties. For the assessment of the retro-reflective potential, a directional reflectivity characterization has been carried out by means of an innovative experimental equipment.

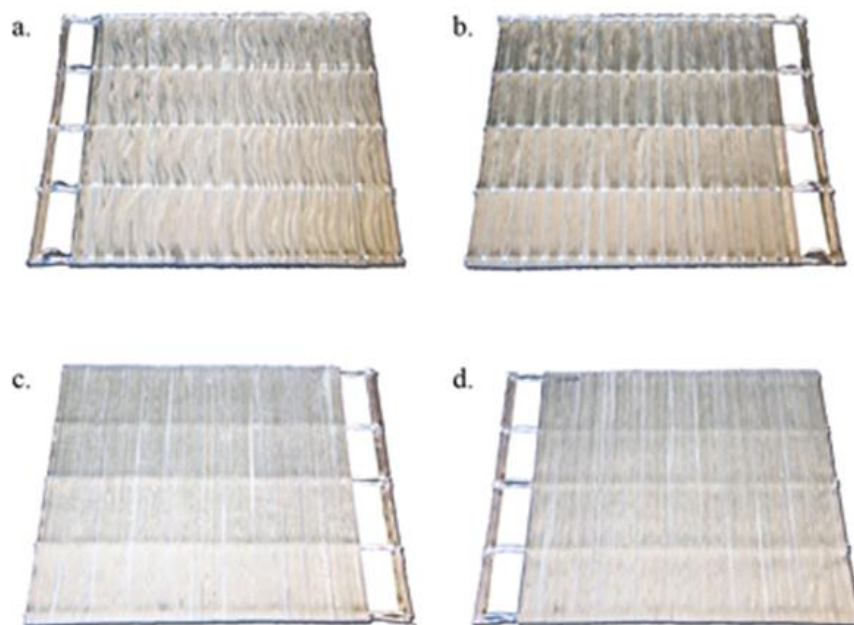
3.1. Description of Samples

As previously mentioned, four white glass-fibre samples of approximately 20 cm x 20 cm dimensions have been selected and tested. A picture of the four samples is shown in Figure 2 and a brief description of their aesthetic features is provided below:

- *Curve* sample: It consists in a 20 cm x 20 cm white, glass fibre-based panel, characterized by curved yarns;
- *Straight* sample: It is a 20 cm x 20 cm white, glass fibre-based panel with straight-oriented yarns;
- *Smooth Opaque* sample: It consists in a 20 cm x 20 cm white, glass fibre-based panel, with straight-oriented yarns and a matte finishing;
- *Smooth Bright* sample: It is a 20 cm x 20 cm white, glass fibre-based panel, characterized by straight-oriented yarns and a bright finishing.

The selected samples have been analysed in terms of thermal emissivity, solar reflectance and retro-reflective properties: firstly, thermal emissivity has been measured by means of a portable differential thermopile emissometer; secondly, solar reflectance has been evaluated in the UV, VIS and NIR regions for wavelengths from 300 to 2500 nm through the use of a spectrophotometer and, finally, a directional reflectivity characterization of samples have been carried out by using a novel experimental facility, in order to investigate retro-reflective capabilities of samples.

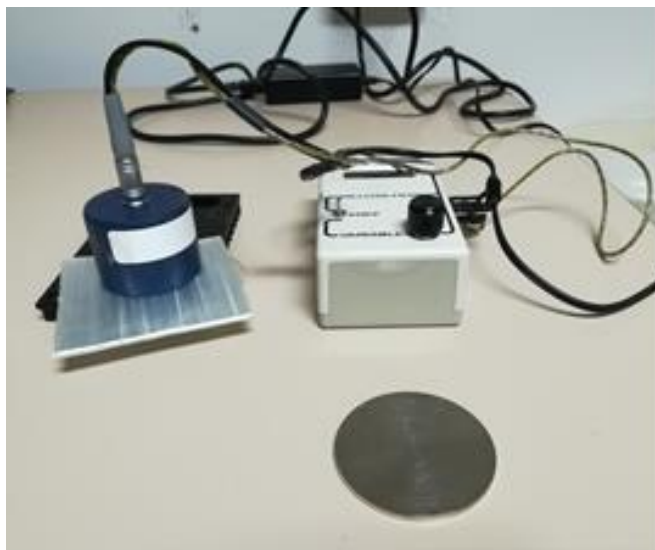
Figure 2. a. *Curve* sample; b. *Straight* sample; c. *Smooth Opaque* sample; d. *Smooth Bright* sample.



3.2. Emissivity Analysis

A portable differential thermopile emissometer was used for the measurement of the total hemispherical emittance of the material, in accordance with ASTM C1371 standard test method [9]. The specific emissivity measurements have been performed by means of an AE1 RD1 Emissometer D&S with Scaling Digital Voltmeter (Devices & Services Co., Dallas, Texas), as shown in Figure 3. Technical features of the abovementioned emissometer are presented in Table 1. The portable emissometer apparatus is composed by a Differential Thermopile Radiant Energy Detector, a Controlled Heater, a Readout Device, a Heat Sink Stage, two Reference Standards (a high-emittance and a low-emittance one, characterized by emissivity values of 0.9 and 0.06, respectively) and, finally, the sample to be tested [9].

As the emissivity depends only on the specific material and it does not change with fibre pattern and orientation of yarns, a single 10 cm x 10 cm sample of glass-fibre material was selected for the emissivity analysis. After the calibration of the emissometer, three different measurements have been carried out, because of the non-homogeneity of the sample.

Figure 3. AE1 RD1 Emissometer D&S with Scaling Digital Voltmeter and the tested sample**Table 1.** Characteristics of AE1 RD1 Emissometer D&S with Scaling Digital Voltmeter

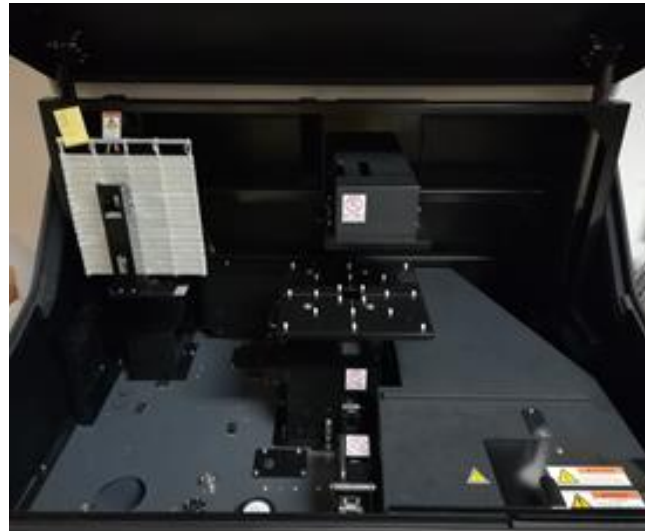
Features	Specifications
Repeatability	± 0.01 emittance units
Warming Up Time	30 minutes
Total hemispherical emittance approximation	150 F (65°C)
Sample dimension	2.25 inches (5.7 cm)
Output	2.4 millivolts nominal, with sample emittance of 0.9 and sample temperature of 78 F (25°C)
Linearity	± 0.01 units
Time constant	10 seconds
Sample temperature	130 F maximum (54.4°C)
AC Power Adapter	Universal AC adapter, 100-240V, 50-60 Hz, 12 Volts DC

Source: AE1 RD1 Emissometer D&S specification sheet (Devices & Services Co., Dallas, Texas)

3.3. Spectrophotometric Analysis

Spectrophotometric measures for the glass-fibre samples have been performed through an UV-VIS-NIR Spectrophotometer, model Shimadzu SolidSpec-3700, equipped with a 60 mm integrating sphere (Figure 4), whose technical features are listed in Table 2. The wavelength range of the spectrophotometer varies from 240 to 2600 nm, including UV, VIS and NIR regions.

For the purpose of the work, spectrophotometric measurements have been performed within a wavelength range from 300 to 2500 nm, in accordance with ASTM E903 standard test method [10]. Five measurements have been carried out for each 20 cm x 20 cm glass-fibre sample, as the specimens surface is non-homogeneous, for a total of 20 measures in the whole wavelength range.

Figure 4. Shimadzu SolidSpec-3700 Spectrophotometer and one of the tested samples**Table 2.** Characteristics of Shimadzu SolidSpec-3700 Spectrophotometer

Features	Specifications
Wavelength range	240 nm to 2600 nm
Spectral bandwidth	UV-VIS: 8 steps (0.1 to 8 nm) NIR: 10 steps (0.2 to 32 nm)
Resolution	0.1 nm
Wavelength accuracy	UV-VIS: ± 0.2 nm NIR: ± 0.8 nm
Wavelength repeatability	UV-VIS: within ± 0.08 nm NIR: within ± 0.32 nm
Noise	<0.0002 Abs (500 nm, SBW 8 nm) <0.00005 Abs (1500 nm, SBW 8 nm) determined under conditions of RMS value at 0 Abs and 1 second response
Photometric range	-6 to 6 Abs

Source: Shimadzu SolidSpec-3700 Spectrophotometer specification sheet

3.4. Directional Reflectivity Characterization

For the investigation of materials' retro-reflective capabilities, traditional in-lab and in-situ analysis, e.g. with a spectrophotometer with integrating sphere, does not correctly describe their angular reflectance distribution, as stated in [6]. For that reason, a new experimental facility was used in order to assess the angular reflectivity of the four 20 cm x 20 cm glass-fibre samples.

The innovative experimental array consists in the following elements:

- An artificial solar source, which is composed by an IP65-rated micro-spotlight in anodized aluminium. A summary of the lamp main technical features is reported in Table 3;
- A semicircular equipment (with a diameter of approximately 0.85 m), to which the artificial solar source is attached, in a way that it is free to move along the curved axis. The sample to be tested is positioned at the centre of the semicircular facility, over a flat and black surface, in order to avoid other light reflected components than the ones provided by the sample. The semicircular frame is provided with a graduate scale each 10 degrees, corresponding to 17

possible positions of the lamp, i.e. at -10° , -20° , -30° , -40° , -50° , -60° , -70° , -80° , 90° , 80° , 70° , 60° , 50° , 40° , 30° , 20° , 10° . A 90° lamp position means incident radiation which is perpendicular to the sample surface. A picture of the entire experimental facility can be seen in Figure 5a.

- A Photo-Radiometer Delta Ohm HD 9221, with an LP 9221/RAD probe for irradiance measurements along the semicircular frame (Figure 5b). Technical features of the Photo-Radiometer and the irradiance probe are listed in Table 3.

For the detection of the directional reflectivity properties, all the four 20 cm x 20 cm glass-fibre samples have been tested, in order to assess a possible correlation between angular reflectivity and surface yarn orientation. For each sample, the lamp has been placed in 9 positions, covering a half of the semicircular frame, i.e. at -10° , -20° , -30° , -40° , -50° , -60° , -70° , -80° , 90° . It was possible to reduce the number of the lamp positions from 17 to 9 due to the symmetry of the equipment geometry. For each position of the lamp, 17 irradiance measurements have been carried out, by placing the LP 9221/RAD probe each 10 degrees along the semicircular axis, in order to measure the magnitude of the radiation reflected from the sample for each angle from -10° to 10° .

Figure 5. a) Experimental equipment for the directional reflectivity characterization; b) Photo-Radiometer Delta Ohm HD 9221 with an LP 9221/RAD probe



Table 3. Characteristics of the main equipment components

Component	Features	Specifications
Artificial Solar Source (Lamp)	Power	2W
	Supply Current	500 mA
	Color Temperature	4200 K
	Luminous Flux	154 lm
	Driver	On/Off (non-dimmable)
Photo-Radiometer Delta Ohm HD 9221	Spectral range	450 nm to 950 nm
	Measurement range	$1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ to $200 \text{ mW}/\text{cm}^2$
	Probe precision	$\pm 4\%$
	Linearity	$\pm 1\%$
	Resolution	$\leq 200 = 0.1; \geq 200 = 1$
	Stability	0.15%

Source: Artificial Solar Source and Photo-Radiometer Delta Ohm HD 9221 specification sheets

4. Results and Discussion

4.1. Emissivity Analysis

Emissivity measurements for the 10 cm x 10 cm glass-fibre sample are reported in Table 4. Results show slightly high emissivity values, with an average of about 0.79. High emissivity surfaces for outdoors could result in higher air temperature and mean radiant temperature in the surroundings, leading to worse thermal comfort conditions, especially in hot summer days. A possible optimization of the tested material could involve the addition of a low-emittance layer on the internal side of the curtain, in order to minimize the infrared radiation downward and therefore ensuring better thermal comfort conditions under the coverings.

Table 4. Emissivity measurements results

Measure n.	Emissivity
1	0.78
2	0.80
3	0.78
Average	0.787

4.2. Spectrophotometric Analysis

As previously described, five measurements have been collected for each 20 cm x 20 cm glass-fibre sample, because of the non-homogeneity of the material surface. Averaged results for each sample are reported in Figure 6 in terms of spectral reflectance over the whole wavelength range, from 300 to 2500 nm. Results show that the *Smooth Bright* and the *Smooth Opaque* samples present a very similar behaviour in terms of spectral reflectance over the whole wavelength range; however, the *Smooth Opaque* sample has a slightly higher reflectance than the *Smooth Bright* one within the NIR region, for wavelengths that range from 2240 to 2500 nm. The *Straight* sample has the worst performance from 300 to 1700 nm, while the *Curve* sample present the lowest spectral reflectance for wavelengths above 1700 nm.

4.3. Directional Reflectivity Characterization

As shown in graphs of Figures from 7 to 10, for incident beam directions near the perpendicular (i.e. from 90° to $\pm 60^\circ$), all the tested samples reveal a retro-reflective tendency, coupled with a slightly diffusive behaviour. As the incident beam direction moves towards the horizontal, i.e. for angles from $\pm 50^\circ$ to $\pm 10^\circ$, a specular tendency progressively occurs for all the samples.

Furthermore, it is noticeable that the major RR tendency for incident beam directions near the perpendicular constitutes an important issue for UHI mitigation, especially in summer during the central hours of the day, i.e. when the sun is in vertical position with respect to the horizontal surfaces. For that reason, textile materials for outdoor horizontal curtains with RR tendency for high angles (i.e. near 90°) are to be preferred, because they could avoid multiple reflections, also ensuring the reduction of the radiation trapped within the Urban Canyon.

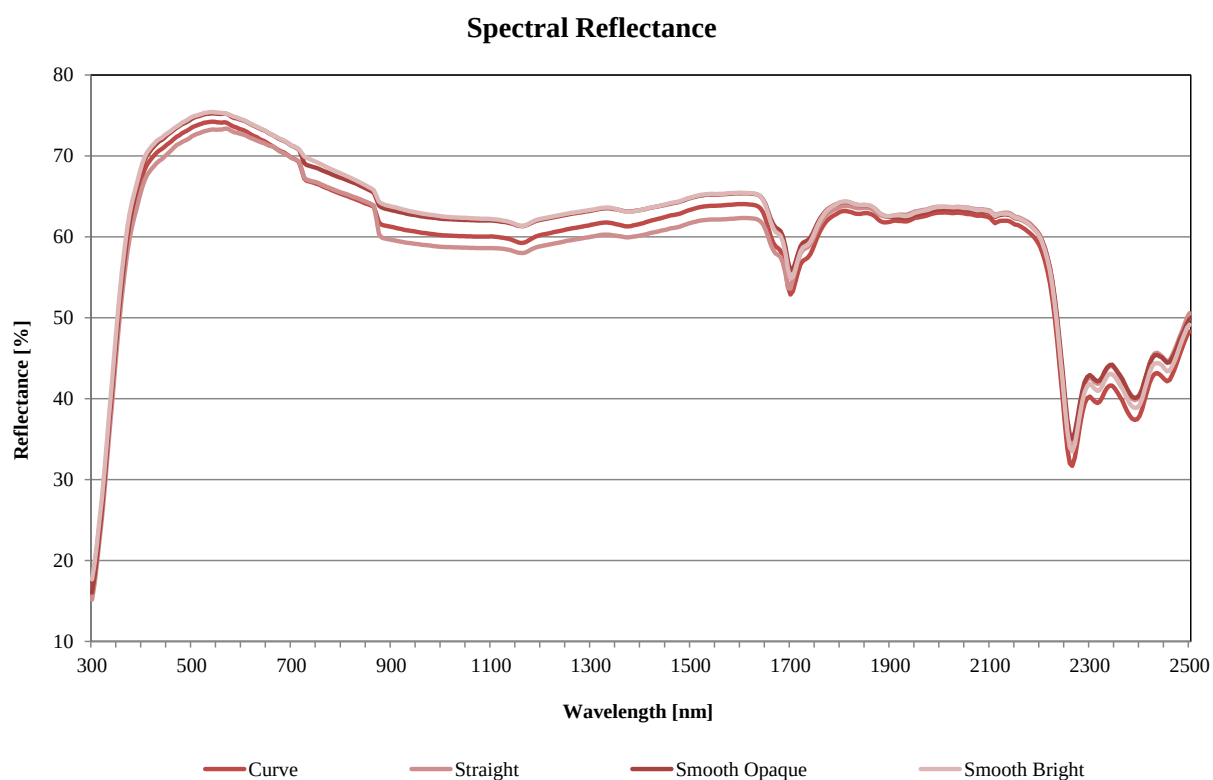
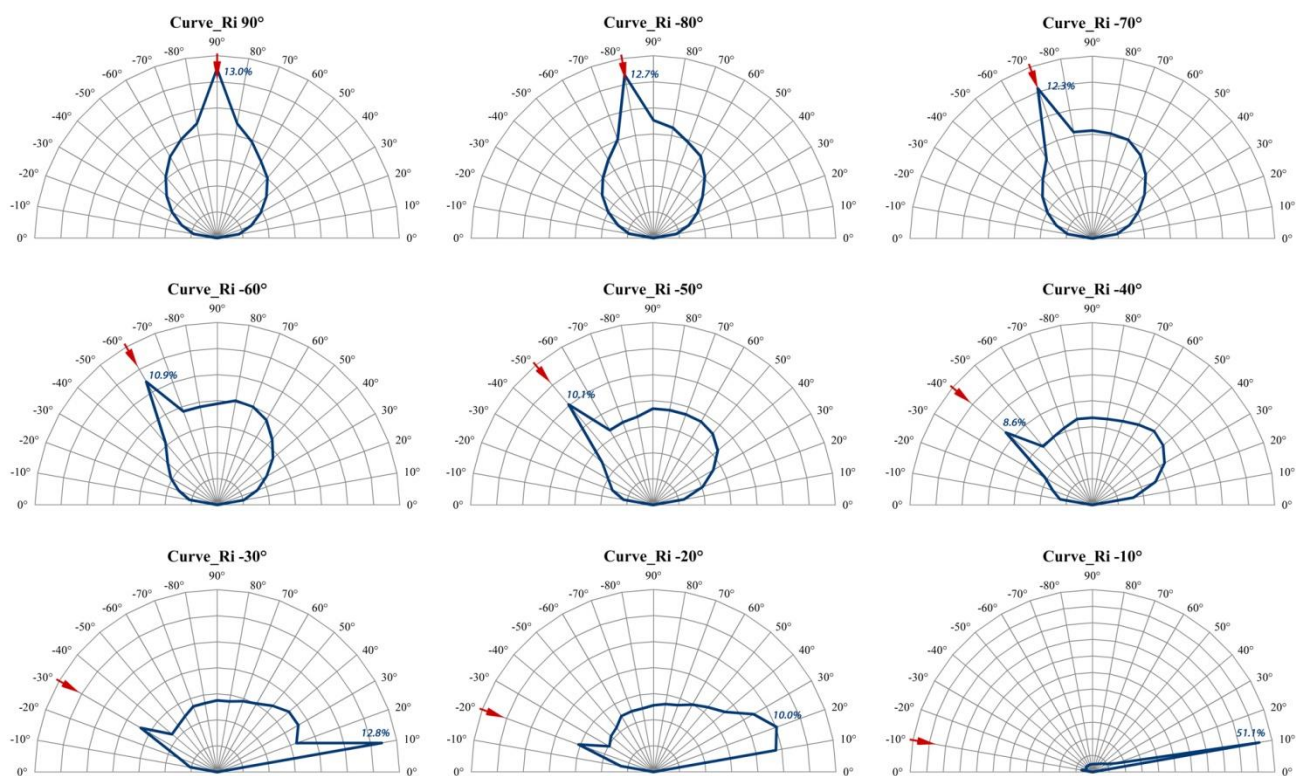
Figure 6. Spectral Reflectance of samples from 300 to 2500 nm**Figure 7.** Directional Reflectivity for *Curve* sample

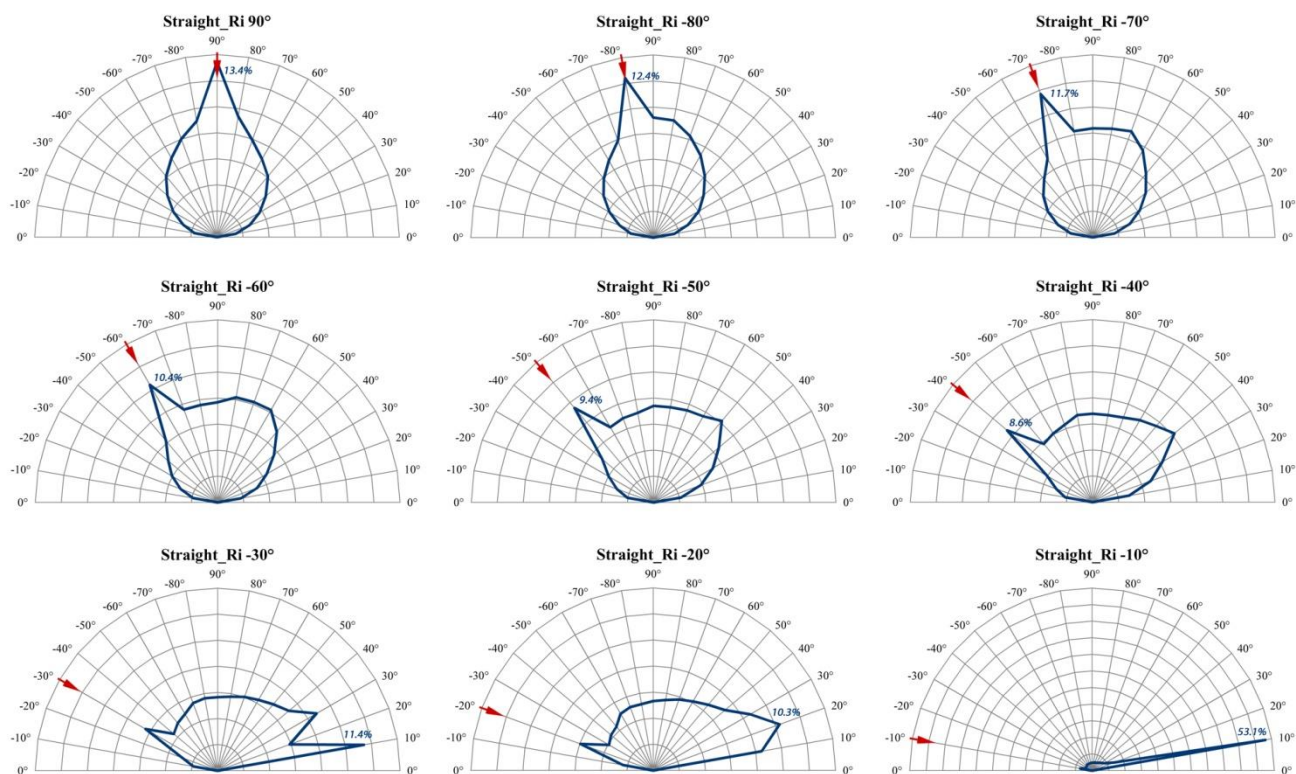
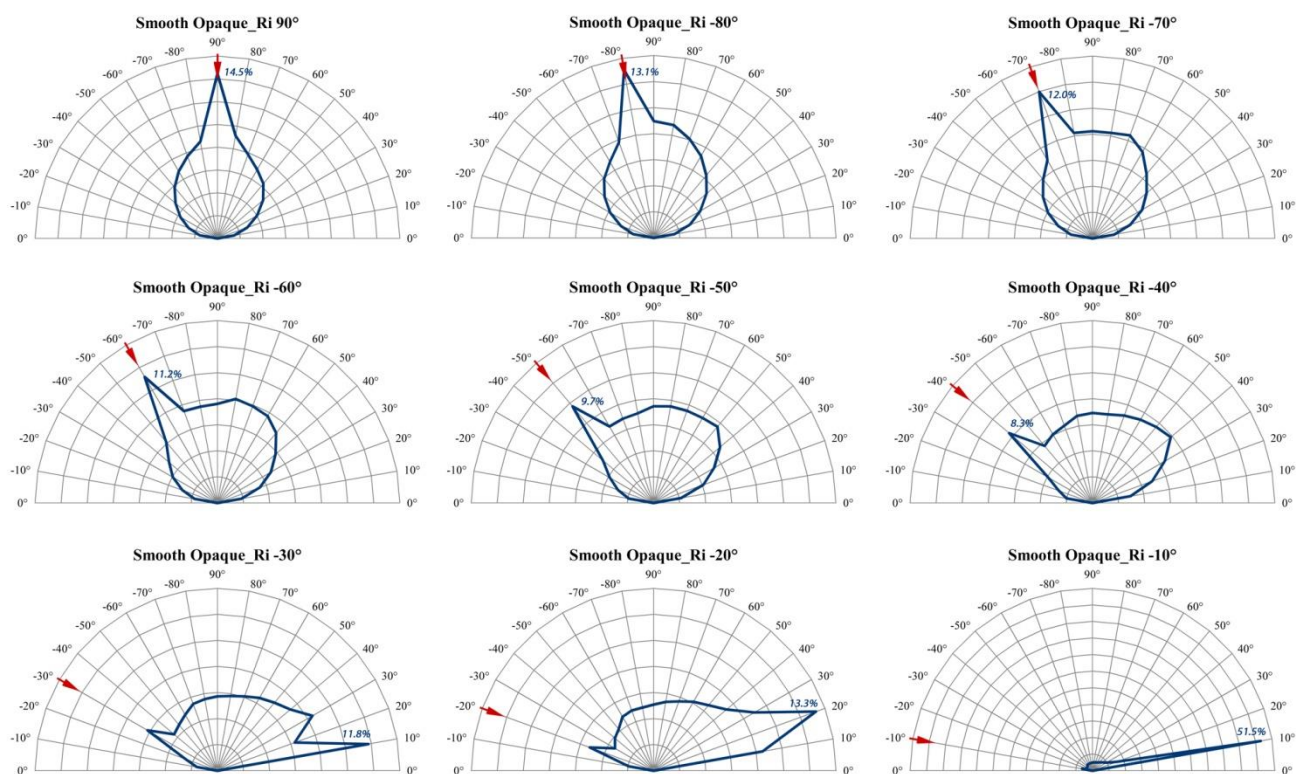
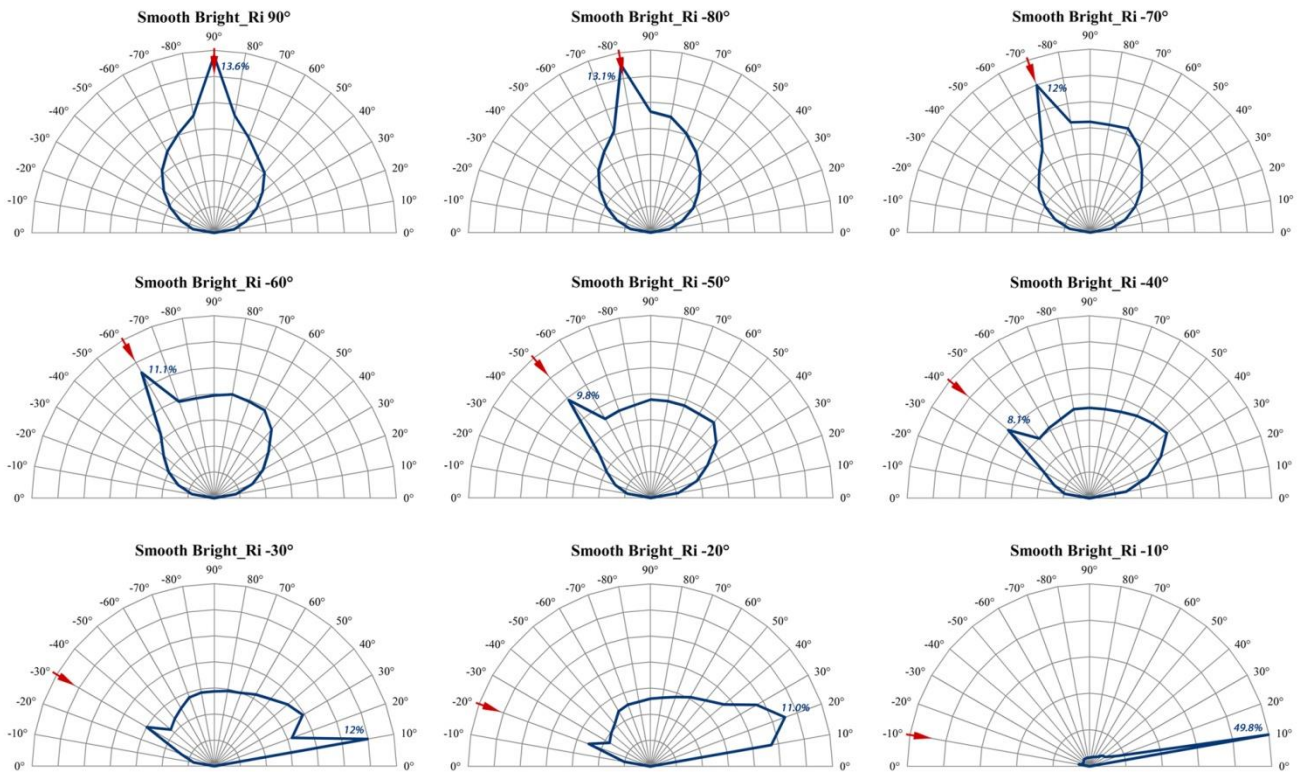
Figure 8. Directional Reflectivity for *Straight* sample**Figure 9.** Directional Reflectivity for *Smooth Opaque* sample

Figure 10. Directional Reflectivity for *Smooth Bright* sample

5. Conclusions and Further Developments

In this work, a novel, glass fibre-based material for outdoor shading applications has been investigated in terms of thermal emittance, solar reflectance and directional reflectivity properties. Results of the experimental campaign show that the considered material presents high values of emissivity, while a good solar reflectance has been detected. Furthermore, the directional characterization of the material revealed that all the samples have a retro-reflective tendency for incident beam directions near the perpendicular. In a next step of the research, optimized solutions will be proposed, with higher solar reflectance on the external side of the curtain and lower infrared emissivity towards the covered area. In this way, the proposed advanced covering solutions could positively affect urban microclimate, by contributing to the mitigation of urban heat island and therefore by reducing outdoor discomfort, especially in summer conditions.

Acknowledgements

The authors' acknowledgements are due to I-MESH company, which provided the glass-fibre samples for the experimental characterization.

References

1. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2017). "World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables". Working Paper No. ESA/P/WP/248.
2. Oke T.R., "The Heat Island of the Urban Boundary Layer: Characteristics, Causes and Effects". In: Cermak J.E., Davenport A.G., Plate E.J., Viegas D.X. (eds) *Wind Climate in Cities. NATO ASI Series (Series E: Applied Sciences)* **1995**, 277. Springer, Dordrecht.
3. Frohlich D., Gangwisch M., Matzarakis A. "Effect of radiation and wind on thermal comfort in urban environments – Application of the RayMan and SkyHelios model" *Urban Climate* **2019**, 27, 1-7.
4. Pisello A.L., Saliari M., Vasilakopoulou K., Hadad S., Santamouris M. "Facing the urban overheating: Recent developments. Mitigation potential and sensitivity of the main technologies." *WIREs Energy and Environment* **2018**, 7, e294. <https://doi.org/10.1002/wene.294>
5. Garshasbi S., Santamouris M. "Using advanced thermochromic technologies in the built environment: Recent development and potential to decrease the energy consumption and fight urban overheating" *Solar Energy Materials and Solar Cells* **2019**, 191, 21-32.
6. Rossi F., Pisello A.L., Nicolini A., Filipponi M., Palombo M. "Analysis of retro-reflective surfaces for urban heat island mitigation: A new analytical model" *Applied Energy* **2014**, 114, 621-631.
7. Rossi F., Castellani B., Presciutti A., Morini E., Filipponi M., Nicolini A., Santamouris M. "Retroreflective façades for urban heat island mitigation: Experimental investigation and energy evaluations" *Applied Energy* **2015**, 145, 8-20.
8. Rossi F., Castellani B., Presciutti A., Morini E., Anderini E., Filipponi M., Nicolini A. "Experimental evaluation of urban heat island mitigation potential of retro-reflective pavement in urban canyons" *Energy and Buildings* **2016**, 126, 340-352.
9. ASTM C1371-15, Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emissometers, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org
10. ASTM E903-12, Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org

XIX Congresso Nazionale CIRIAF

Energia e Sviluppo Sostenibile

Development of a New Hydrothermal Carbonization Reactor with Renewable Energy Supply for Olive Pomace Treatment

Francesco Micali¹, Barbara Mendecka², Lidia Lombardi³, Arturo de Risi¹

¹ Department of Engineering for Innovation, University of Salento, Via per Arnesano, Lecce

² Department of Industrial Engineering - University of Florence, Viale G. Morgagni, Florence

³ Department of Industrial Engineering - University of Rome Niccolò Cusano, Via Don C. Gnocchi, Rome

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: barbara.mendecka@unifi.it

Abstract: Hydrothermal carbonization (HTC) represents one of the emerging technologies for upgrading biomass. Olive oil is one of the strategic agriculture products in Mediterranean countries. The olive oil industry produces two types of waste/by-product: pomace, resulting from olive pulp, and mill wastewaters, essentially constituted by process water and olive aqueous fraction. No definitive solution has been found, so far, under the technological, economical and management of disposal points of view, with respect to the environment protection. Therefore, the need of creating an environmental friendly supply chain is accompanied by the need of valuating the byproducts to let the olive oil industry to become energy independent. The present PRIN project with cooperation of University of Florence, Cusano University of Rome and University of Salento is focused on the definition of an innovative process to enhance the end-products of the oil industry (e.g. olive pomace and mill waste water) into secondary raw materials by development of a new HTC reactor with renewable energy supply able to process olive pomace and mill wastewater. Consequently, the work is composed by the following tasks: development of a high temperature lab scale HTC reactor, lab – scale experimental campaign, development of an energy saving HTC reactor, renewable supply and life cycle assessment.

Keywords: Hydrothermal Carbonization, Olive Mill Waste, Biomass Upgrading

1. Introduction

Olive oil is one of the strategic agriculture products in Mediterranean countries, and olive pomace and olive mill wastewater are the main by-products of the olive industry. Olive pomace consists of

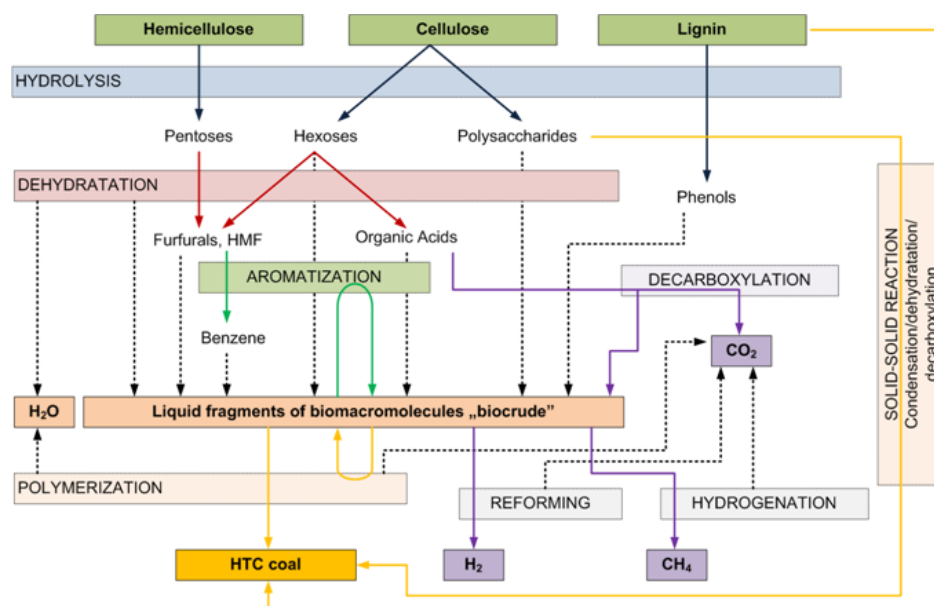
lipids 20-25% (triglycerides and fatty acids), fibers (cellulose and hemicellulose) 20-30%, water 70-80% and proteins (10-13%) depending on the process applied [1].

No definitive solution has been found, so far, under the technological, economical and management of disposal points of view, with respect to the environment protection. During the peak period of the olives processing, that is in the range from November to March, depending on the production location, the olive oil mills, due to the difficult operating conditions, have no way to operate modern and efficient disposal and recycling and thus they discharge liquid and solid waste on the soil. This yields the contamination of soil, of aquifer and of surface water, due to the high concentration of organic material, that is responsible of a pollution potential up to 80 times that of the city wastewater, particularly if this discharging is done in uncontrolled manner and without any respect of the environment protection and reusing of wastewater and solid waste of olive oil mills laws. The need of creating an environmental friendly supply chain is accompanied by the need of valuating the byproducts to let the olive oil industry to become energy independent. Olive pomace is characterized by high moisture content, but after a proper pre-treatment, it could have the potential as energy sources. Olive pomace also contains oils. Thus before being effectively used as a combustion fuel, it has to be pre-treated by drying and employing oil extracting treatments [2]. The olive growing industry has all the potentiality to compete with the other renewable energy sources. Effectively, the Province of Lecce alone produces 62.8 kt/year of pomace that means a potential thermal energy of 193.7 GWh, compared to a total of 170.7 kt/year of pomace of the entire Puglia region with a potential of 526.4 GWh of thermal energy.

In this scenario, the present project is focused on the development of a new HTC reactor with renewable energy supply able to process olive pomace and mill wastewater. Therefore, the main objective of this project is to define an innovative process to enhance the end-products of the oil industry (e.g. olive pomace and mill waste water) into secondary raw materials by developing a new hydrothermal carbonization reactor powered by renewable energy.

2. Hydrothermal Carbonization of olive mill wastes

One of the technologies that allows converting the wet biomass feedstock effectively into an upgraded carbonaceous biofuel, without previous pre-treatment, is hydrothermal carbonization (HTC). Thus, as an alternative, olive pomace can be upgraded into an enhanced fuel, called hydrochar, by using HTC. HTC is combined dehydration and decarboxylation of raw biomass to raise its carbon content, with the aim of achieving products with an improved heating value. The HTC process consists in heating the by-products of the olive oil industry (e.g., olive pomace and mill wastewater) in a reactor where high temperatures (typically in the range 150–300°C) and pressure (10-100 bar) are kept for several hours. Typical reaction pathway is presented in Figure 1. With this method, the solid and organic fractions of the end-products are transformed in a lignite-like, easy to handle fuel with well-defined properties, whereas the water contained in the initial charge is sterilized and it is characterized by a near to zero residual Chemical Oxygen Demand (COD).

Figure 1. HTC process and reaction pathway

3. Development of a New Hydrothermal Carbonization Reactor with Renewable Energy Supply for Olive Pomace Treatment (PRIN project)

The main objective of project is to develop a new HTC reactor with renewable energy supply able to process olive pomace and mill wastewater. In order to reach this goal project is composed by the following five tasks (Figure 2).

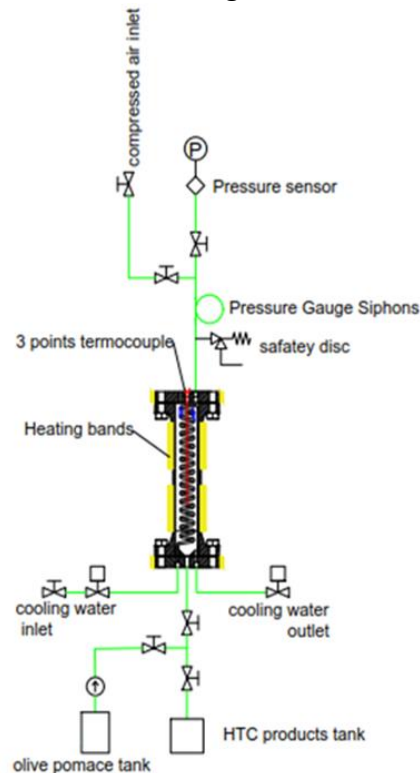
Figure 2. Project tasks

	Work Package	Leader
WP1	Development of a high – temperature lab – scale HTC reactor 1.1 State of the art. 1.2 Design of lab scale HTC reactor 1.3 Lab – scale prototype	University of Salento
WP2	Lab – scale experimental campaign 2.1 Experimental analysis of HTC on olive pomace	University of Salento
WP3	Development of an energy saving HTC reactor 3.1 State of the art. 3.2 Design of energy saving HTC reactor 3.3 Prototype building 3.4 Experimental analysis	University of Salento
WP4	Renewable energy supply and LCA 4.1 Analysis of alternative renewable energy supply 4.2 Life Cycle Assessment	University of Florence
WP5	Lab – scale evaluation of anaerobic digestion olive waste 5.1 Lab scale evaluation of anaerobic digestion of olive waste	University of Florence

The present WP1 regards the development of a high-temperature lab-scale HTC reactor. A batch reactor with a volume of 5.0 L, designed for a maximum pressure of 100 bar and maximum temperature of 310 °C made from AISI Type 304 Stainless Steel was developed and constructed to investigate the HTC process. Four heating bands of thermal power 9.8 kW totally were used to heat

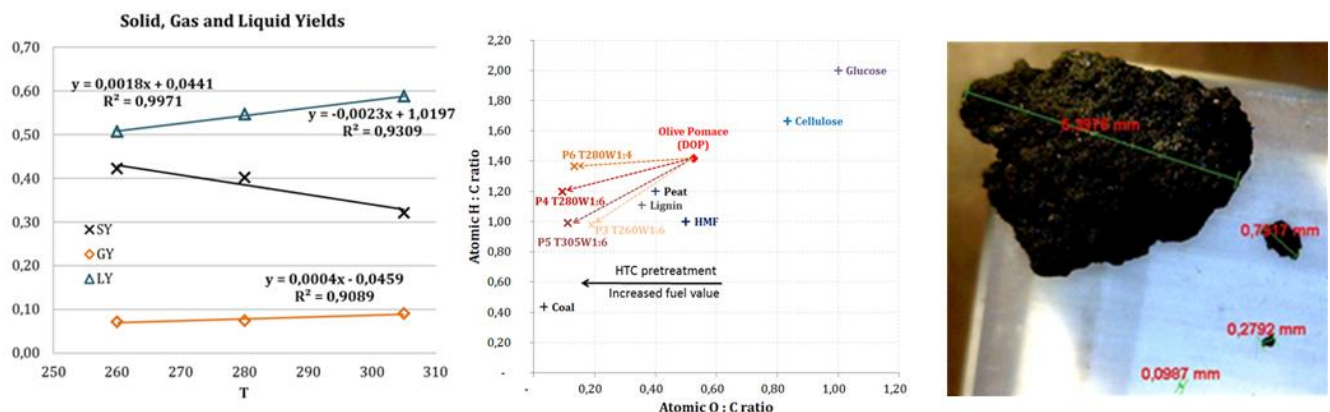
up the reactor and keep the required reaction temperature during the reaction process. The cooling loop system consists of 23 coils with an outer diameter of 60 mm. The cooling time of the biomass content from 300 ° C to temperatures below 100 ° C is estimated to be about 15 minutes, considering the thermal inertia of the steel (the weight of the steel pressure vessel is about 45 kg). Schematic representation of the reactor is presented in Figure 3.

Figure 3. Schematic diagram of batch reactor



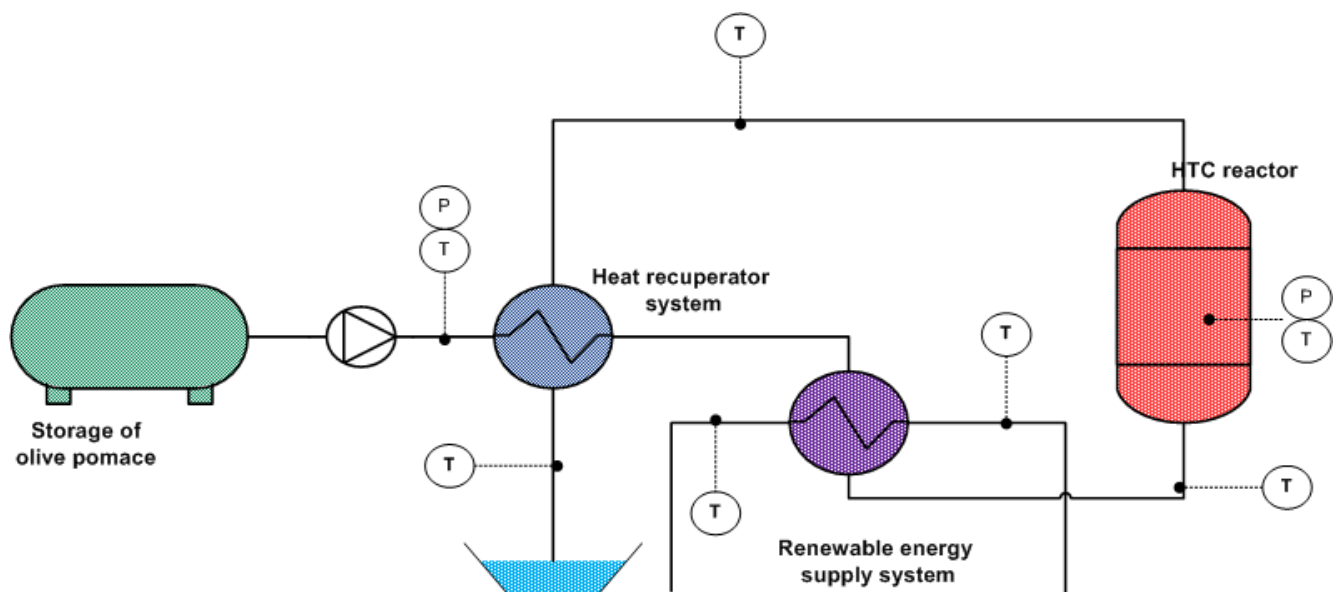
Task WP2 is devoted to the experimental campaign of HTC using olive pomace. Moreover, in this activity, heat content of the products before and after the experimental tests will be measured in order to validate the industrial interest of HTC. Some of results regarding mass yield and van Krevelen diagram are presented in Figure 4.

Figure 4. Mass yields and Van Krevelen diagram of the feedstock and chars produced during HTC after 180 minutes residence time



Task WP3 regards the development of an energy-saving HTC reactor. This activity is devoted to analyze the possible alternatives to supply the required energy to the studied process by means of renewable energy sources, with the aim of making the proposed system the most possible self-sufficient from an energy point of view. In order to supply the required thermal energy the following possibilities will be investigated: combustion of the solid product from the HTC process; solar energy; combustion of other biomass available in the olive mill nearby; etc. The study will be conducted with reference to: demonstration lab reactor size (WP3) and hypothetical industrial scales. On the basis of technical feasibility and environmental impact (WP4, act. 4.2) of the examined renewable alternatives, the preferred option will be selected. According to this selection, the specific design of the renewable system integrated with the demonstration lab reactor of WP3 will be carried out in collaboration with the leader partner. The research and development activities are focused on the present technical and design solutions of the similar products existing on the market or described in the literature. After the preliminary investigation of the state of the art of the traditional solutions yet adopted, the most potentially efficient ideas, among those that will produce the most efficient solutions, will be identified to pursue the proposed targets, according to an appropriate priority. The proposed solutions will be valued and then selected according to criteria as efficiency, size, weight, constructive advantages, costs of manufacture, and considering other factors as the technological limits, as well as materials selection and manufacturing techniques. Figure 5 shows a schematic diagram of the energy saving hydrothermal reactor for olive pomace and mill wastewater. This system is composed by: • storage for olive pomace and mill wastewater; • pump to feed the reactor; • heat recuperator system, which is devote to preheat the biomass; • renewable energy supply system; • HTC reactor.

Figure 5. Schematic diagram of energy saving HTC system



A Life Cycle Inventory (LCI) model will be implemented for the process considering the selected alternatives in term of renewable energy supply according to the most relevant LCA guidelines (ISO

14040/44:2006, European Commission-JRC reports, etc.). Two set of data will be collected and elaborated to represent every technology's life cycle model: i) data on the process from WP2 and WP3; ii) data about renewable technologies integration from previous phase of this WP4.

The analysis of the possible industrial upscaling of the process will supply additional inputs for the LCI and will allow performing also the assessment in reference to a hypothetical real size plant. A Life Cycle Impact Assessment (LCIA) analysis will follow considering a broad spectrum of environmental impact indicators in accordance to state-of-the-art LCIA methods (e.g. ReCiPe, IMPACT World, etc.).

4. Expected results

The aim of this research project is to develop an innovative HTC reactor with solar energy integration to produce energy from the by-products of olive oil industry. The economic and environmental benefits will contribute to support the sector of olive oil industry by transforming a problem (the management of the by-products) into a source of income "biochar" that is an high quality biofuel. The proposed project has not only the objective to enhance the overall efficiency, but also to reduce the disposal costs. The introduction of the HTC technology will contribute to reduce the energy demand the overall CO₂ emissions of the olive oil companies. The olive oil industry is placed in the countries of the Mediterranean sea and in particular in Greece, in Spain and in Italy in Puglia and Toscana regions.

The technology that this project wants to develop is of particular interest not only for the national market, but also for the international one.

At the moment there is no similar product on the market and indeed for this reason the management of the pomace (with no market appreciable value) and the mill wastewater is a big environmental and economic problem for all the olive oil companies. The technology proposed in this project would be able to have a good feedback from the evolution of the future market and the evolution of the demand particularly from the companies that operate in this sector. The HTC reactor has the potentiality to have a good position in the market among the technologies of treatment of the organic waste, biomass and in the processing industry. The solar energy system could be applied in many situations where a high temperature integration is needed.

Literature

- [1] Vlyssides A., Loizides M, Karlis P. Integrated strategic approach for reusing olive oil extraction by-products. *J Clean Prod* 2004;12:603–11. doi:10.1016/S0959-6526(03)00078-7.
- [2] Intini F, Kühtz S, Rospi G. Energy Recovery of the Solid Waste of the Olive Oil Industries—LCA Analysis and Carbon Footprint Assessment. *J Sustain Energy Env* 2011;2:157–166.

XIX Congresso Nazionale CIRIAF

Energia e Sviluppo Sostenibile

Exergetic and environmental performance evaluations of a solar assisted adsorption chiller with thermal storage

Barbara Mendecka^{1,*}, Gino Bella ² and Raffaello Cozzolino ³

¹ Department of Industrial Engineering - University of Florence, Viale G. Morgagni, Florence

² Department of Business Engineering - University of Rome Tor Vergata, Via del Politecnico, Rome

³ Department of Industrial Engineering - University of Rome Niccolò Cusano, Via Don C. Gnocchi, Rome

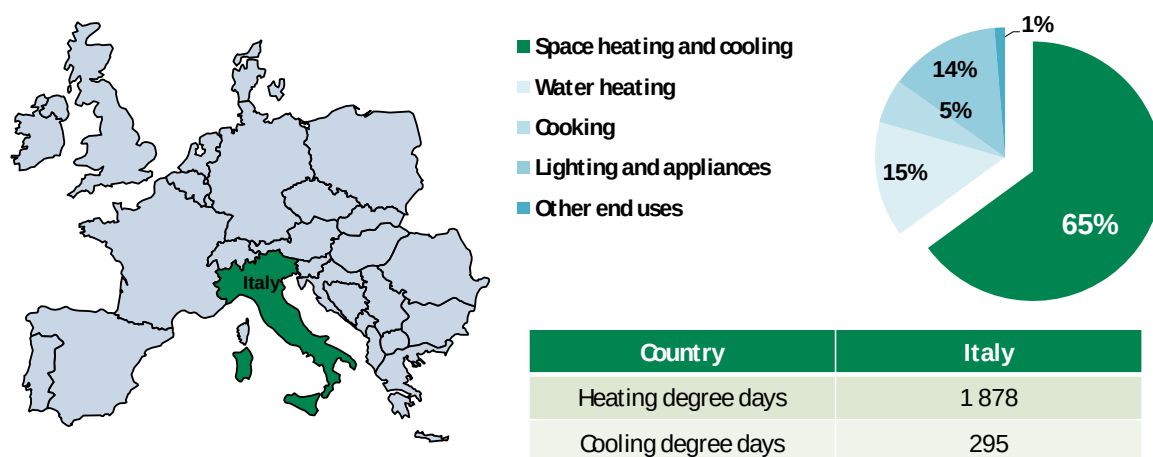
* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: barbara.mendecka@unifi.it

Abstract: This work applies the exergo-ecological analysis using the concepts of environmental cost and exergy cost for the performance evaluation of an integrated system for heating and cooling production using solar energy. The considered system is equipped with an adsorption chiller supplied with heat from a solar collector and a thermal storage unit. The main goal of this work is to compare different technical solutions for the thermal storage unit. Therefore, two arrangements are considered: i) a sensible (water) thermal storage unit and ii) a Phase Change Material (PCM) thermal storage unit. PCMs represent indeed an extremely interesting solution to store thermal energy, due to their high latent heat occurring during the phase change process. The presented results of exergy cost analysis indicate that the most favorable system is the one integrated with PCM storage. Finally, the results were validated by extending the system boundary to the level of natural resource and by applying Life Cycle Analysis (LCA) and environmental cost analysis to the considered system.

Keywords: Exergy Analysis; Life Cycle Analysis; Solar Energy; Energy Storage; Phase Change Materials

1. Introduction

The residential sector represents about 40% of global energy consumption [1]. Large large amount of the consumed residential energy is used for space heating and cooling and hot water supply [2]. As presented in Figure 1, in Italy around 65 % of residential energy is consumed for space heating and cooling [3].

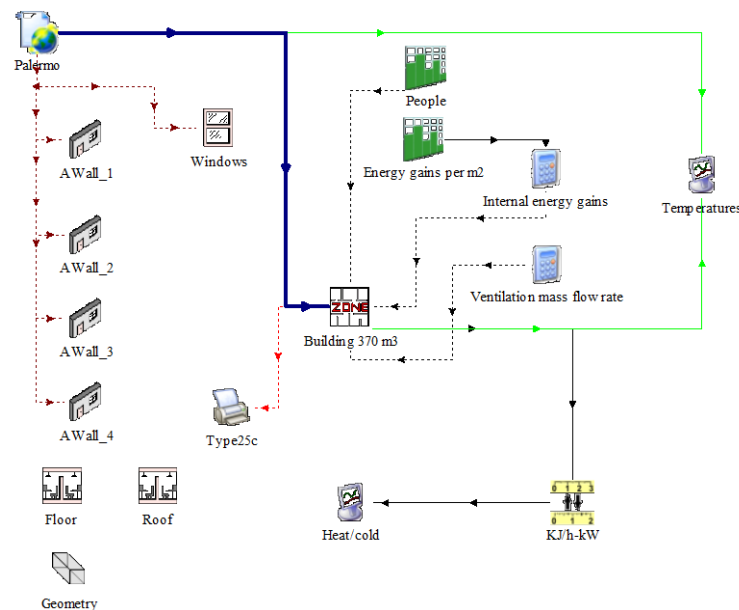
Figure 2. Residential energy consumption in Italy

Heating and cooling for residential applications with solar energy significantly reduces the use of fossil energy sources and decreases atmospheric pollution; these results have clear environmental and economic benefits. However, solar energy is not always produced in the periods and in the forms in which it is used; therefore, it is often necessary to accumulate it to make it available at different times or in different places. Thermal energy can be stored using sensible heat (heating and cooling of a material), latent heat (melting and solidification, vaporisation and liquefaction) and thermochemical (binding energy) [4].

The main objective of this study is to compare the exergy and environmental performances of solar cooling and heating system equipped with two different storage tanks. First analysed system includes a solar driven adsorption chiller coupled with a sensible thermal storage unit, while the latter is coupled with phase change material (PCM) thermal storage unit.

2. Materials and methods

The cooling and heating load was calculated using TRNSYS software that allowed to perform both: steady-state and transient analysis. The simulation was performed for all the year calculating heat losses and gains assuming the weather conditions for Palermo. It was assumed the following internal temperatures: 20 °C, in the winter season and 26 °C, in the summer season. As the results, design loads, as well as annual energy demand, were obtained. Scheme of building model is presented in Figure 2.

Figure 2. Scheme of building model in TRNSYS software

As a result from the building model, temperature and load profiles were obtained as presented in Figure 4 and Figure 5. From load profile it was possible to retrieve designed cooling and heating load (Table 1).

Figure 4. Annual temperature profile
(blue line: internal zone temperature, red line: ambient temperature)

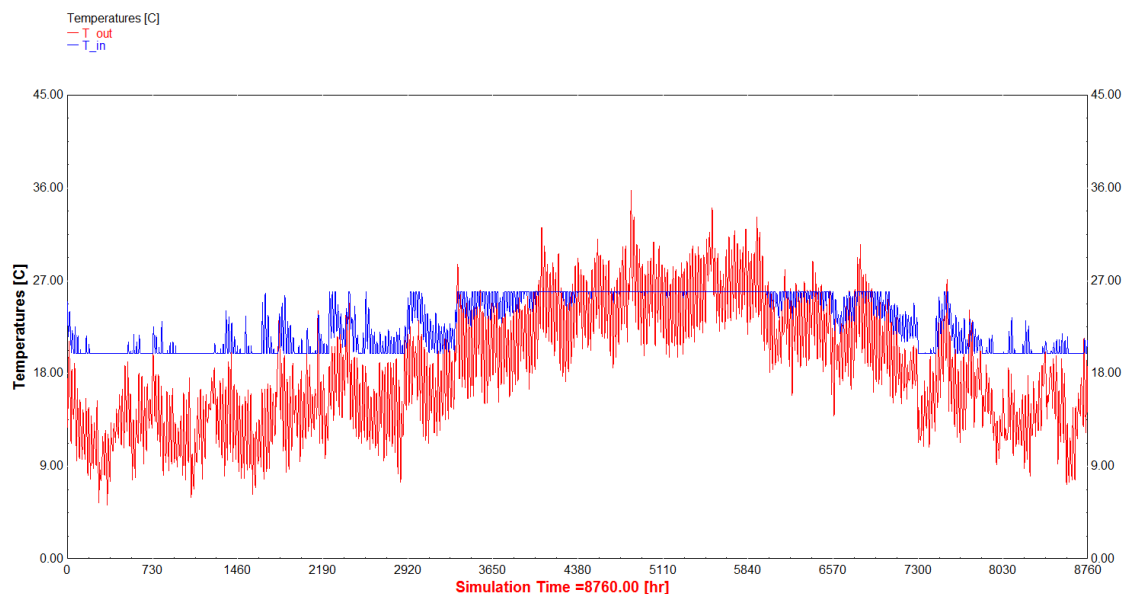
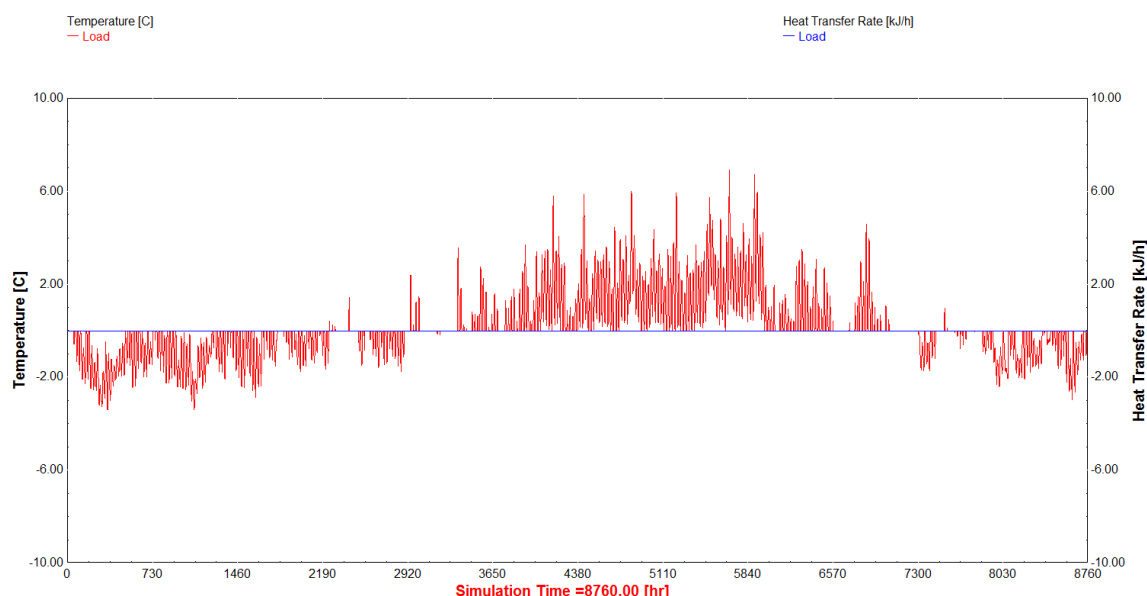


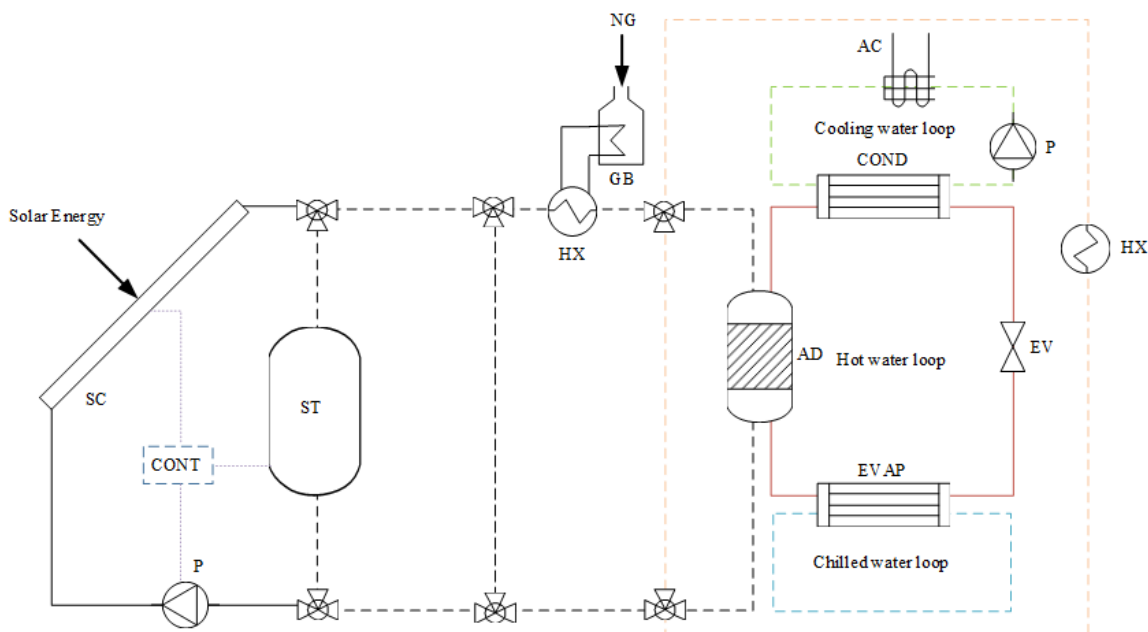
Figure 5. Annual load profile (positive values: cooling load, negative values: heating load)**Table 1.** Peak loads (Design cooling and heating capacity)

Site	Peak cooling load, kW	Peak heating load, kW
Palermo	6.9 (25 august)	3.4 (15 january)

The analyzed solar heating and cooling system consist of a collector field that produces hot water which feed an adsorption machine and heating loop. The main components of the system which are depicted in Figure 6 can be described as follows. The main source of energy is solar irradiance which is used by the solar collector field to heat the circulating water. The field is composed of 38 m² of SKY PRO 22 CPC 58 compound parabolic collector. The accumulation system is made up of storage tank allowing to cover 3 h of maximal input (Q_{MAX} 35 kW). The cooling cycle is and adsorption cycle of designed capacity of 16 kW that works with water as a hot /chilled and cooling fluid and it requires its driven inlet temperature to be within the range 55-80 °C; chilled water setpoint temperature is assumed to be 16°C, while the cooling water setpoint temperature to be 30°C. Type 909 (silica gel-water adsorption chiller) relies on the standard TRNSYS external data file format. The file provides values of normalised capacity ratio and normalised COP ratio for a number inlet hot water temperatures, inlet cooling water temperatures, and inlet chilled water temperatures. An auxiliary energy system consisting of a gas fired heater can be used to complement the energy supplied by the collector field when there is not enough solar radiation. A building load simulator (presented in Figure 2) allows to perform simulation and obtain the heat and cold demand for different weather conditions. The plant operates with two different energy sources (solar and gas), which can be combined or used independently, depending on the current conditions. The plant can be re-

configured manipulating open/close valves and pumps to allow the selection of the components for energy supply. The control objective is to supply water to the cooling and heating system at the demanded temperature, minimizing auxiliary energy (gas) consumption and fulfilling operational constraints for the adsorption machine and heating loop. The primary energy source, i.e. solar radiation cannot be manipulated. This means that the control system must keep the inlet temperature conditions at desired level (80°C for heating season, 55-80°C for the cooling season). The inlet water is the mix of water coming from the solar collectors, tank and auxiliary heater, when additional energy is needed. Additionally, the temperature of water in the solar system can be controlled by adjusting the water flow inside the solar field.

Figure 6. Structure of analysed solar cooling and heating system: SC – solar collector, ST- thermal storage, GB—boiler furnace, NG – natural gas, P – pump, HX –heat exchanger, EVAP—evaporator, COND – condenser, AD – adsorption bed, EV – expansion valve, AC—cooling tower [5]



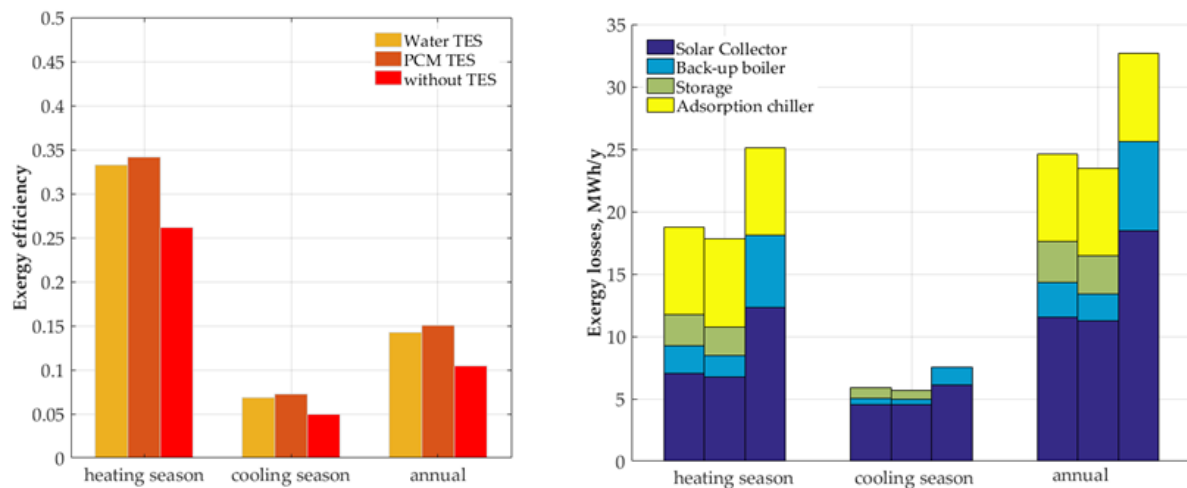
3. Results

In this section, the results for the simulation of the investigated systems are presented. The transient simulation was run with 60s time step. The initial temperatures in all subsystems were assumed to be equal to ambient temperature. In every time step, the required heating or cooling loads, available solar energy and energy transferred to the system and respective performance parameters are calculated.

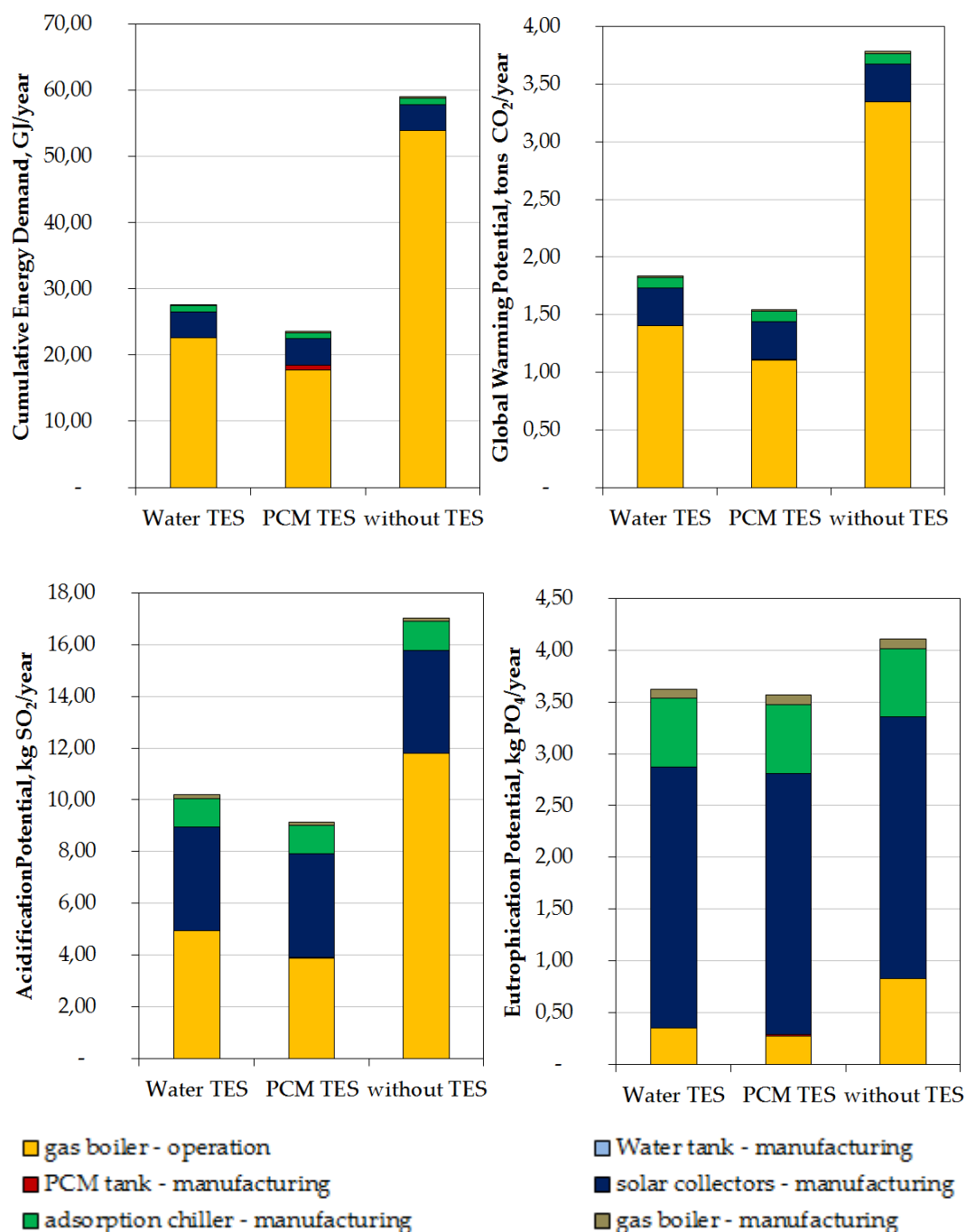
As we presented in our previous work [5], for the assumed configuration of solar field area without storage tank capacity it was possible to obtain around 36.5 % of coverage the annual demand directly by solar source. When water TES is coupled with the solar system, the fraction of useful solar energy significantly increases to around 74%. The highest annual SF around 79% was observed for

PCM integrate system. Generally, the solar fraction was higher for the cooling period, which occurs in summer period when the more solar source is available. When storage tank of the maximal thermal capacity of 36 kWh is introduced to the system, fraction of useful solar energy significantly increases, and is slightly higher around 5.7 percentage points for the system with PCM tank. PCM materials are able to store more heat per unit volume than conventional storage materials such as water. However, for the same storage capacity, latent heat storage system comparatively yields more hot water at a constant temperature as compared to the sensible storage system. Exergy efficiency of the considered systems is compared in Figure 7 on an annual basis as well as heating and cooling season. The lowest exergy efficiency was obtained for the system without a storage tank. The values were 8.9%, 21.6% and 4.2 % for annual, heating and cooling periods, respectively. The annual exergy efficiencies of the integrated system with sensible storage tank for annual as well as heating and cooling season were 11.5%, 26.2% and 5.5 % respectively. While for the PCM were around 0.5, 0.7 and 0.3 percentage points higher for the same cases, respectively. The difference, in this case, is lower than for the energy performance. it can be noted that the highest exergy destruction occurs in solar collector followed by adsorption chiller. This is generally confirmed by many literature studies [6],[7].

Figure 7. Exergy performance comparison of sensible – water and PCM tanks



As far as environmental performance is considered, Life Cycle Impact Assessment (LCIA) was conducted. In particular, the following criteria: Cumulative Energy Demand (CED), Global Warming Potential (GWP), Acidification (AP) and Eutrophication (EP) Potentials were compared. Figure 8 presents the results for annual basis.

Figure 8. Environmental performance comparison of sensible – water and PCM tanks

It can be noted the highest environmental impact for system without energy storage due to significantly higher natural gas consumption. The lowest impacts were observed for system with PCM integrated storage tank. Main contributors to environmental impact were gas boiler operation (CED, GWP and AP and solar collectors manufacturing (for EP). PCM and water tank manufacturing stages were negligible.

4. Conclusions

In this work, two different solar systems arrangements providing heat and cold to a building, were analysed and compared: system equipped with adsorption chiller supplied with heat from the solar collector and sensible (water) thermal storage unit and system equipped with adsorption chiller supplied with heat from the solar collector and PCM thermal storage unit. The comparison was made using exergy and environmental analyses. The results of exergy analysis indicate that the most favorable system is the one integrated with PCM storage. The results were validated and confirmed by extending the system boundary to the level of natural resource and by applying Life Cycle Analysis (LCA) and environmental cost analysis to the considered system. PCM technology holds significant promise for extending and developing of solar aided energy systems in residential sector.

Future work would concentrate on the model development in order to analyse systems coupled with the metal enhanced PCM thermal storage unit and testing the model for different environmental conditions and of varying system operating parameters.

Bibliography

- [1] Cozzolino R. Thermodynamic performance assessment of a novel micro-CCHP system based on a low temperature PEMFC power unit and a half-effect Li/Br absorption chiller. *Energies* 2018;11:315. doi:10.3390/en11020315.
- [2] Patel JH, Qureshi MN, Darji PH. Experimental analysis of thermal energy storage by phase change material system for cooling and heating applications. *Mater Today Proc* 2018;5:1490–500. doi:10.1016/J.MATPR.2017.11.238.
- [3] Eurostat. Energy balance sheets. 2013 data. *Eurostat Stat Books* 2015;1:52–3. doi:10.2785/388553.
- [4] Chen CR, Buddhi D, Sharma A, Tyagi V V, Chen CR, Buddhi D. Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications Review on thermal energy storage with phase change materials and applications 2009. doi:10.1016/j.rser.2007.10.005.
- [5] Mendecka B, Cozzolino R, Leveni M, Bella G. Energetic and exergetic performance evaluation of a solar cooling and heating system assisted with thermal storage. *Energy* 2019;176:816–29. doi:10.1016/j.energy.2019.04.024.
- [6] Mendecka B, Lombardi L, Gładysz P, Stanek W. Exergo-Ecological Assessment of Waste to Energy Plants Supported by Solar Energy. *Energies* 2018, Vol 11, Page 773 2018;11:773. doi:10.3390/EN11040773.
- [7] Saidur R, BoroumandJazi G, Mekhlif S, Jameel M. Exergy analysis of solar energy applications. *Renew Sustain Energy Rev* 2012;16:350–6. doi:10.1016/j.rser.2011.07.162.

XIX Congresso Nazionale CIRIAF

Energia e Sviluppo Sostenibile

Energy optimization of public lighting systems – Assessment of the effects obtainable at urban scale

Tullio de Rubeis *, Dario Ambrosini, Domenica Paoletti

Department of Industrial and Information Engineering and Economics, University of L'Aquila, Piazzale E. Pontieri 1, Monteluco di Roio, L'Aquila AQ I-67100, Italy

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: tullio.derubeis@univaq.it

Abstract: In this work, the lighting system of a municipal road network is analyzed by means of lighting simulation models to define intervention proposals for lighting efficiency improvement and to evaluate the energy and environmental results obtainable. The methodology employed in this work is divided into 4 main steps: 1) to define an inventory of the luminaires currently installed along the road network of the municipality; 2) to create lighting simulation models for assessing the current lighting system performance; 3) to propose energy optimization measures; 4) to assess the energy and environmental results. The Road Lighting System of the municipality considered in this work has a total of 928 luminaires and 25 different lamp typologies, which differ for technology and power. For each of the road sections, lighting simulation models have been realized allowing to observe that the lighting parameters are never satisfied, except for only one road section. Hence, the models allowed to re-design the road lighting systems, verifying the compliance with the lighting parameters and assuming the use of LED technology. The results highlighted a strong energy saving potential (from 81.7 MWh/yr for the current state to 22.2 MWh/yr for the new lighting system solutions) equal to 72.8%. In terms of greenhouse gas emissions, the solutions hypothesized allowed to achieve 28.7 ton/yr of CO₂ avoided.

Keywords: public lighting system; energy efficiency; lighting simulation;

1. Introduction

In the European scenario, the Italian public lighting system is one of the most expensive with 28.7 euros per capita in 2016 with respect to the European average (16.8 euros per capita) [1]. From the energy point of view, in Italy the public lighting is responsible of about 6 TWh in 2017 with 100 kWh per capita, about twice the European average (51 kWh) [2]. Moreover, the lighting energy costs in Europe are about equal to 10% of the total electricity consumption and about 21% for the tertiary sector [3].

Based on this scenario, the public lighting sector is a perfect starting point for energy saving policies especially thanks to the exploitation of highly efficient technologies, such as LED lamps (Light Emitting Diode) with high luminous efficacy and innovative control systems [4, 5]. However, the current lack of systemic approaches, the difficult finding of economic resources by the Public Administration, and the limited interaction among those working in the lighting sector prevent or slow down the evolution of the public lighting system towards a more efficient, innovative, and sustainable service.

Usually, the planning and implementation of lighting systems are performed through subsequent steps, generally disconnected and uneven, which inevitably may involve discontinuity within the night context, as there is no uniform and homogeneous lighting design based on considerations at urban level. The lack of accurate planning in the fulfillment, management and maintenance of public lighting systems is now one of the main causes of the increase in electricity consumption, although the market has adequate innovative technologies able to drastically reduce these consumptions. Nevertheless, the use of light at night is increasing continuously and, for this reason, 80% of the world and 99% of the U.S. and European populations has light-polluted sky conditions [6].

The city lighting design is a particularly complex issue as it includes various disciplines of both lighting design and urban planning. In particular, the main goal of a Road Lighting System (RLS) is to ensure safety for pedestrians and drivers, allowing the detection of objects presence and/or movement at a distance greater (or equal) than the stopping distance, considering the expected travel speed for the evaluated road. Therefore, the visual acuity of residents, pedestrians and drivers depends on the physical characteristics of street lighting, such as light level and uniformity [7].

In this work, the lighting system of a municipal road network is analyzed. Following the standard UNI EN 13201-2 [8] and by using lighting simulation models, intervention proposals for lighting efficiency improvement and to evaluate the energy and environmental results obtainable have been defined. Based on the RLS of the municipality, made up of a total of 928 luminaires and 25 different lamp typologies, lighting simulation models have been realized for each of the road sections allowing to analyze lighting parameters and energy consumption.

The paper is structured as follows. Section 2 proposes the methodology employed in this work. Section 3 discusses the simulations models and Section 4 shows the results obtained. The conclusions are reported in Section 5.

2. Methodology

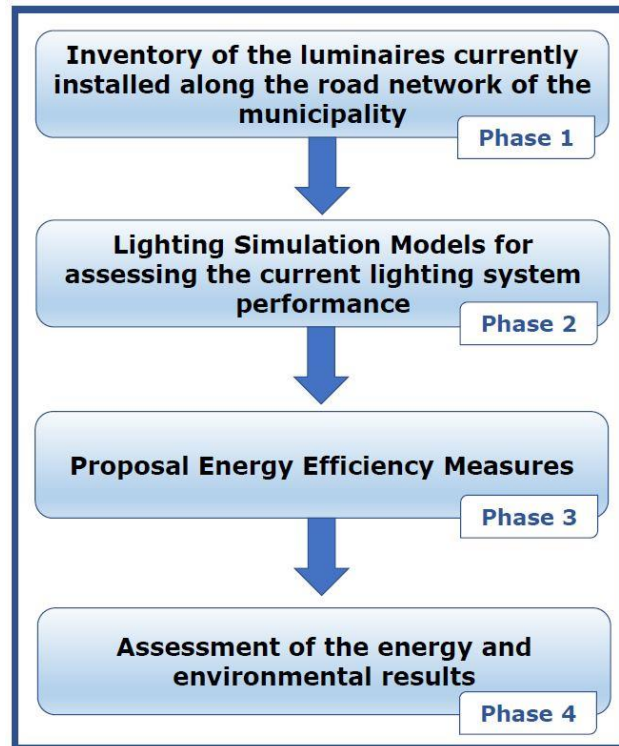
The methodology employed in this work is divided into 4 main phases. The first phase is characterized by the detailed inventory of the luminaires currently installed along the road network of the municipality. This phase allowed to detail the total number of luminaires installed, the installation height, the power of each lamp, and the technology employed.

The second phase is represented by the creation of lighting simulation models, through which the lighting parameters are verified. Once the models of all the road sections were built, it was possible to re-design the road lighting systems (Phase 3), verifying the compliance with the lighting parameters and assuming the use of LED technology.

The last phase (Phase 4) allowed to assess the energy and environmental results by comparing the current state and the optimized scenario.

A block diagram of the methodology employed in this work is shown in Figure 1.

Figure 1. Methodology flowchart employed in this work.



3. Luminaires inventory and Simulation modeling

Based on the inventory of the luminaires installed along the road network of the municipality, a detailed classification was made. 25 lamp typologies, different in technology and power, have been identified, including: sodium-vapor lamps, mercury-vapor lamps, metal-iodide lamps, fluorescent lamps, and only 10 LED lamps. Moreover, the inventory allowed to obtain useful information of the lighting system state-of-the-art:

1. the public lighting systems of the municipality's road sections were built at different time, following its development without adequate planning;
2. some luminaire does not comply with the anti-pollution lighting regulations; moreover, luminaires not suitable for the RLS are frequently used determining very high power and, at the same time, insufficient luminance of the road;
3. in some road section, the luminance is overabundant entailing high operating costs;

At the end of the inventory phase, a detailed classification of the lamps installed was performed, as shown in Table 1.

Table 1. Inventory of the lamps of the RLS.

Lamp typologies	Power [W]	Quantity
Sodium-vapor lamps	70	196
	100	470
	150	167
	250	28
Mercury-vapor lamps	80	2
Metal-iodide lamps	150	1
	250	2
	84	14
Fluorescent lamps	18	18
LED lamps	36	10

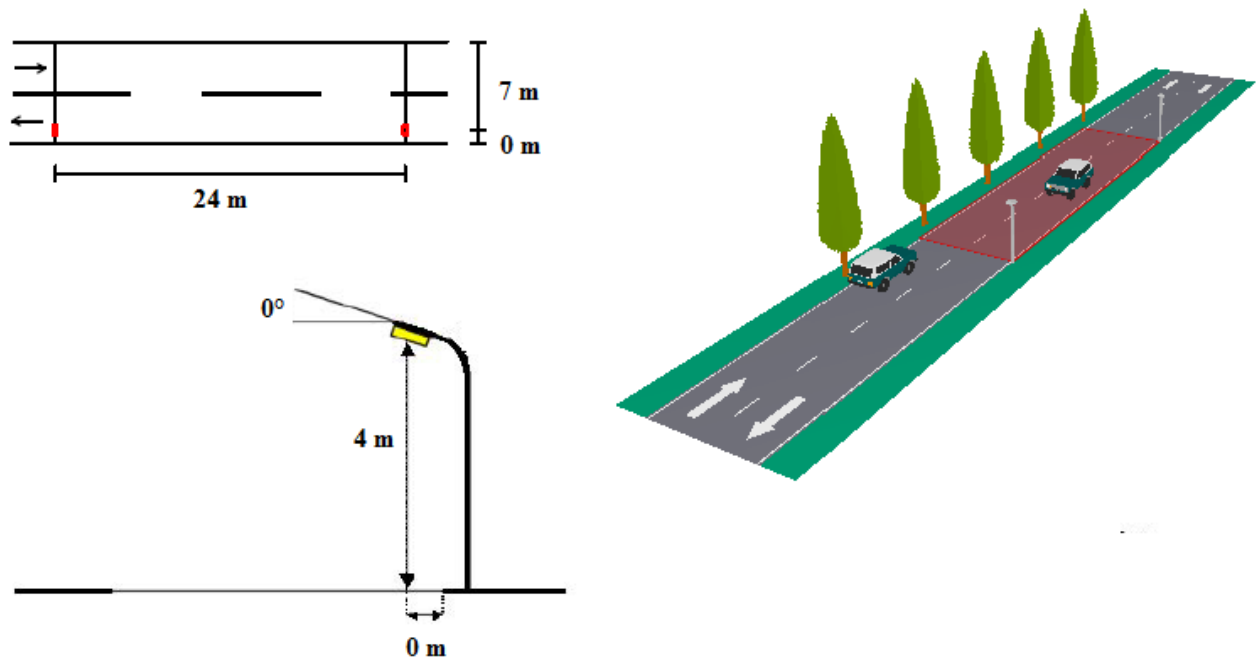
The Relux software, frequently employed for this type of analysis [3, 9] was then used to evaluate the main characteristics of the luminaires, such as the characteristics of the lamps (efficiency, power and luminous flux), the photometric characteristics (illuminance and luminance) and the parameters controlled by Standard UNI EN 13201, i.e. average luminance, general uniformity of brightness with wet and dry asphalt, longitudinal uniformity, disability glare index and proximity ratio). Through the software, some selected road sections have been taken as an example, to evaluate the characteristics of the current system and to propose a new lighting system that complies with current regulations, but with a lower energy consumption. The selection of the road sections was made taking into account the roads with the highest vehicle traffic and installed power. Where possible, interventions that do not involve the remaking of the power lines and the relocation of the luminaires have been hypothesized, only replacing the lamps with LED lamps and keeping the same luminaires.

4. Results

Based on the simulation models and following the standard EN 13201-2, the selected road sections were analyzed considering the comparison between the current state and the optimization scenario in terms of energy performance and lighting requirements. The following subsections summarize some of the simulation models performed in this work.

4.1. Road Section n. 1

The Road Section n. 1 is classified as M4 class according to EN 13201; it has a double lane for a total width of 7 m, and 12 sodium type luminaires, spacing 24 m, with a power equal to 70 W. The luminaires are installed at 4 m height. The simulation model of the Road Section n. 1, shown in Figure 2, together with the spacing between lamps and the installation height, allowed to analyze the actual performance and the results obtainable by replacing the lamps with 40.6 W LED lamps.

Figure 2. Simulation model of the Road Section n. 1.

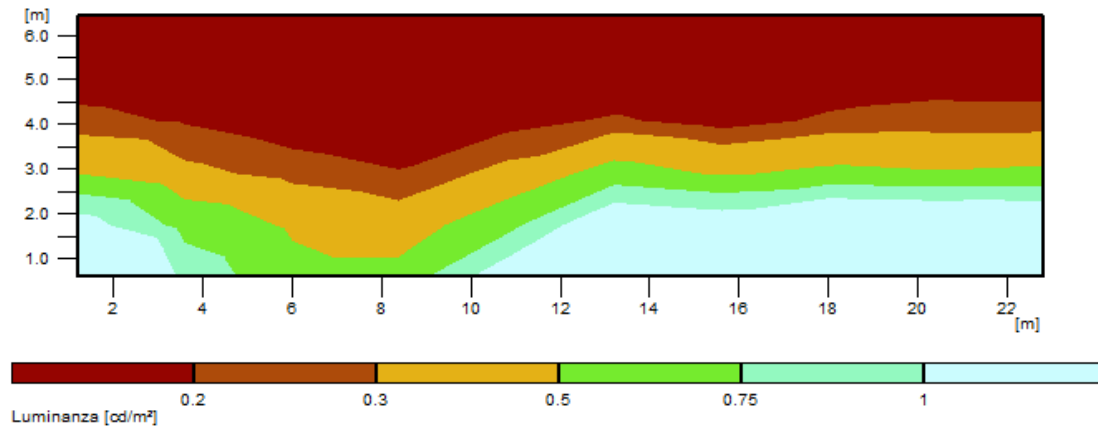
The results obtained in terms of energy performance and lighting requirements are summarized in Table 2.

Table 2. Results obtained for the Road Section n. 1.

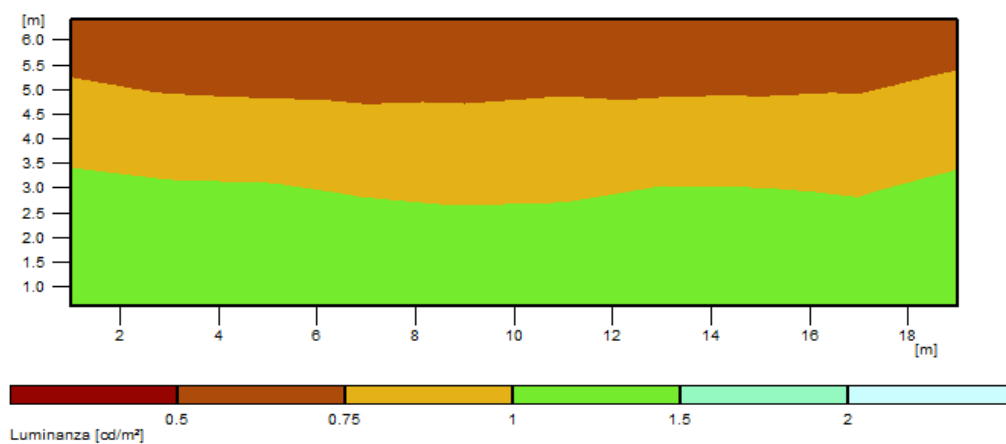
Energy and Lighting quantities	Current state		Optimization scenario		Required value
	Lane 1	Lane 2	Lane 1	Lane 2	
Number of luminaires	12		12		-
Power [W]	70.0		40.6		-
Luminous flux [lm]	3741		5231		-
Luminous efficacy [lm/W]	53.4		128.8		-
Total power [W]	840		487.2		-
Average road surface luminance (L_{av}) [$cd \cdot m^{-2}$]	0.60	0.64	0,90	0,96	≥ 0.75
Overall uniformity (U_o)	0.03	0.03	0,59	0,61	≥ 0.40
Longitudinal uniformity (U_l)	0.26	0.23	0.91	0.90	≥ 0.60
Overall uniformity with wet road surface condition (U_{ow})	0.01	0.01	0.37	0.38	≥ 0.15
Threshold increment (f_{TI}) [%]	37	0	5	4	≤ 15
Edge illuminance ratio (R_{EI})	0.14	0.14	0,61	0,61	≥ 0.30

* The lighting requirements satisfied are highlighted in green color, while the requirements not satisfied are in red color.

The current lighting system does not meet the standard for 11 of 12 verification parameters; in particular, the two parameters concerning the overall uniformity (dry and wet conditions) are far from the minimum value required, due to some areas of the roadway with almost no luminance, as shown in Figure 3.

Figure 3. Luminance distribution with the current lighting system.

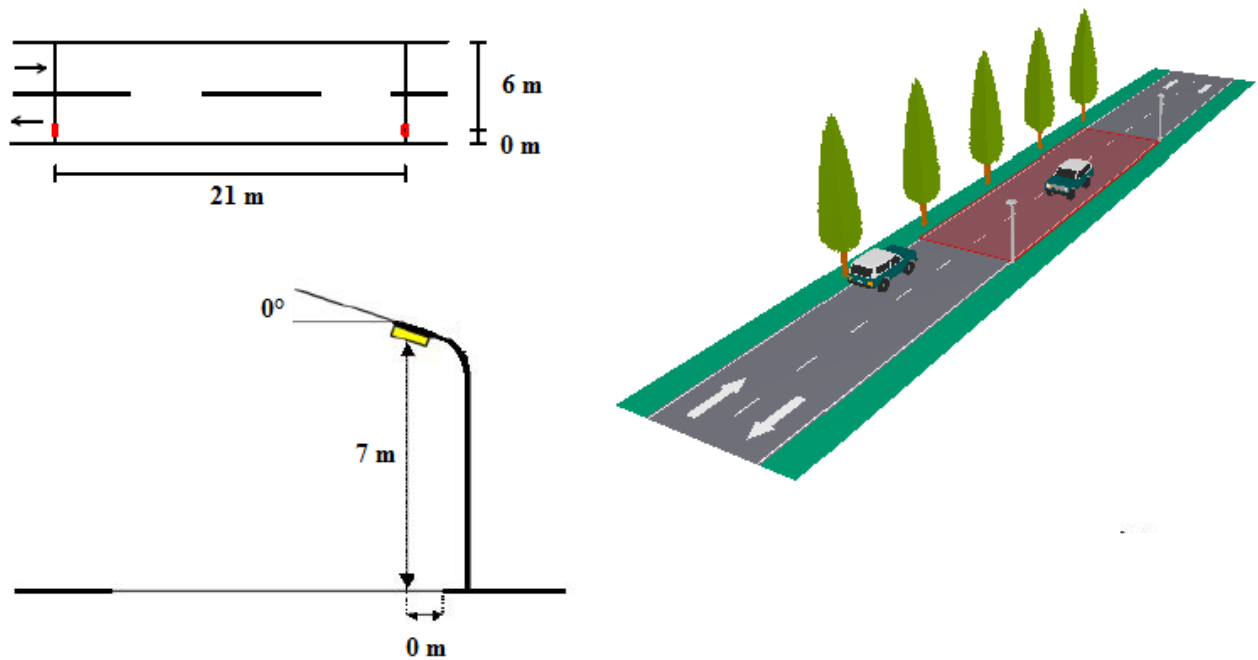
The luminance distribution for the proposed optimization scenario is much more homogeneous, as shown in Figure 4.

Figure 4. Luminance distribution with the optimization scenario.

Therefore, the replacement of the lamps allowed both a reduction of the installed power and a better lighting performance, satisfying the lighting requirements provided by the standard EN 13201-2.

4.2. Road Section n. 2

The Road Section n. 2 is classified as M5 class according to EN 13201; it has a double lane for a total width of 6 m, and 28 sodium type luminaires, spacing 21 m, with a power equal to 100 W. The luminaires are installed at 7 m height. The simulation model of the Road Section n. 2, shown in Figure 5, together with the spacing between lamps and the installation height, allowed to analyze the actual performance and the results obtainable by replacing the lamps with 20.9 W LED lamps.

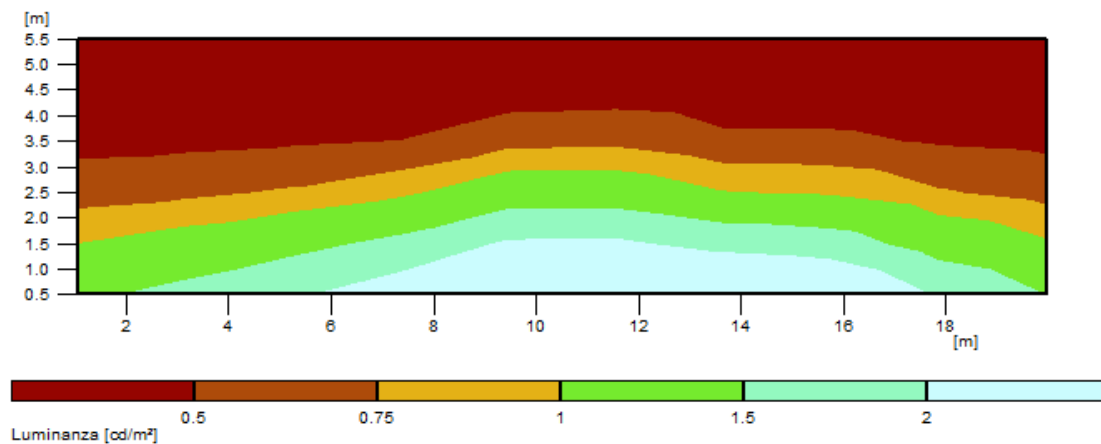
Figure 5. Simulation model of the Road Section n. 2.

The results obtained in terms of energy performance and lighting requirements are summarized in Table 3.

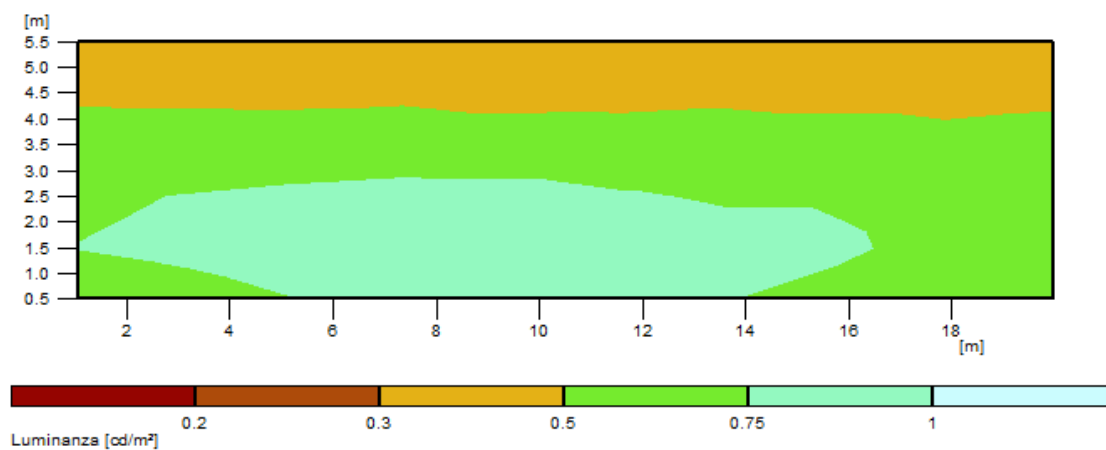
Table 3. Results obtained for the Road Section n. 2.

Energy and Lighting quantities	Current state		Optimization scenario		Required value
	Lane 1	Lane 2	Lane 1	Lane 2	
Number of luminaires	28		28		-
Power [W]	100		20.9		-
Luminous flux [lm]	6599		2610		-
Luminous efficacy [lm/W]	66.0		124.9		-
Total power [W]	2800		585.2		-
Average road surface luminance (L_{av}) [$cd \cdot m^{-2}$]	0.99	0.99	0.58	0.61	≥ 0.50
Overall uniformity (U_o)	0.21	0.21	0.52	0.51	≥ 0.35
Longitudinal uniformity (U_l)	0.48	0.73	0.74	0.91	≥ 0.40
Overall uniformity with wet road surface condition (U_{ow})	0.13	0.12	0.30	0.29	≥ 0.15
Threshold increment (f_{TI}) [%]	3	1	7	6	≤ 15
Edge illuminance ratio (R_{EI})	0.40	0.40	0.49	0.49	≥ 0.30
* The lighting requirements satisfied are highlighted in green color, while the requirements not satisfied are in red color.					

The current lighting system does not meet the standard for overall uniformity, due to an incorrect luminance distribution; the optimization scenario allowed a remarkable energy saving and a better luminance distribution, as shown in Figure 6.

Figure 6. Luminance distribution with the current lighting system.

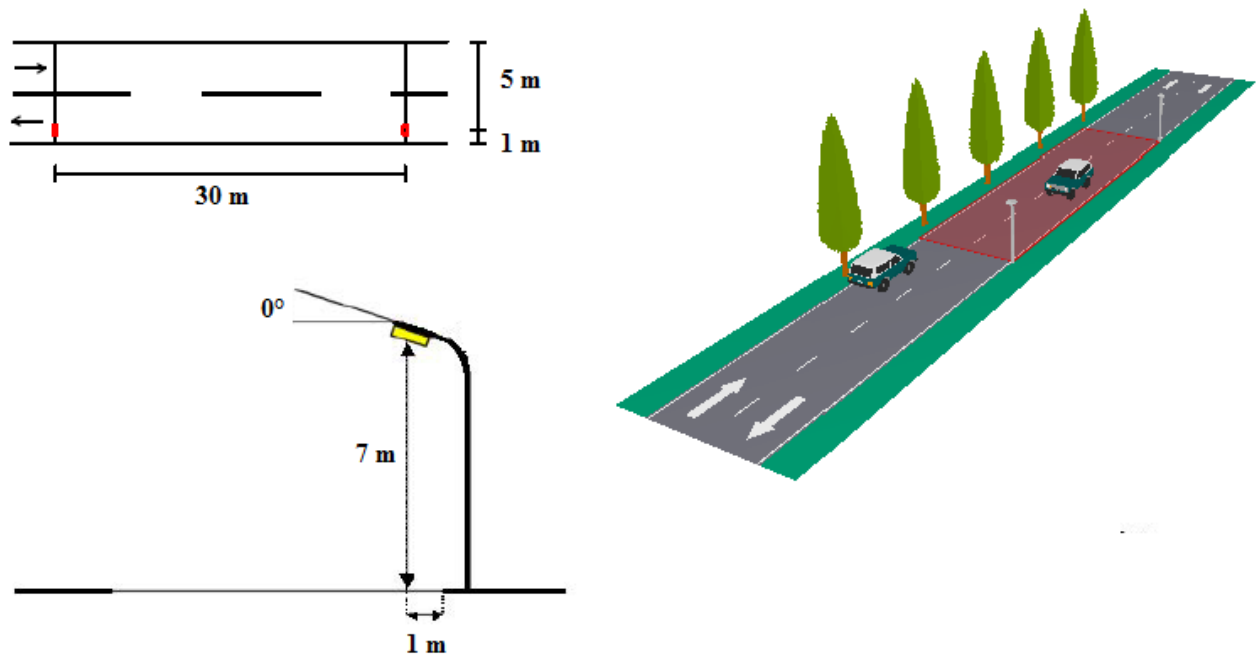
The luminance distribution for the proposed optimization scenario is more homogeneous, as shown in Figure 7.

Figure 7. Luminance distribution with the optimization scenario.

Therefore, the replacement of the lamps allowed, also in this case, both a reduction of the installed power and a better lighting performance, satisfying the lighting requirements provided by the standard EN 13201-2.

4.3. Road Section n. 3

The Road Section n. 3 is classified as M5 class according to EN 13201; it has a double lane for a total width of 5 m, and 24 sodium type luminaires, spacing 30 m, with a power equal to 100 W. The luminaires are installed at 7 m height. The simulation model of the Road Section n. 3, shown in Figure 8, together with the spacing between lamps and the installation height, allowed to analyze the actual performance and the results obtainable by replacing the lamps with 32 W LED lamps.

Figure 8. Simulation model of the Road Section n. 3.

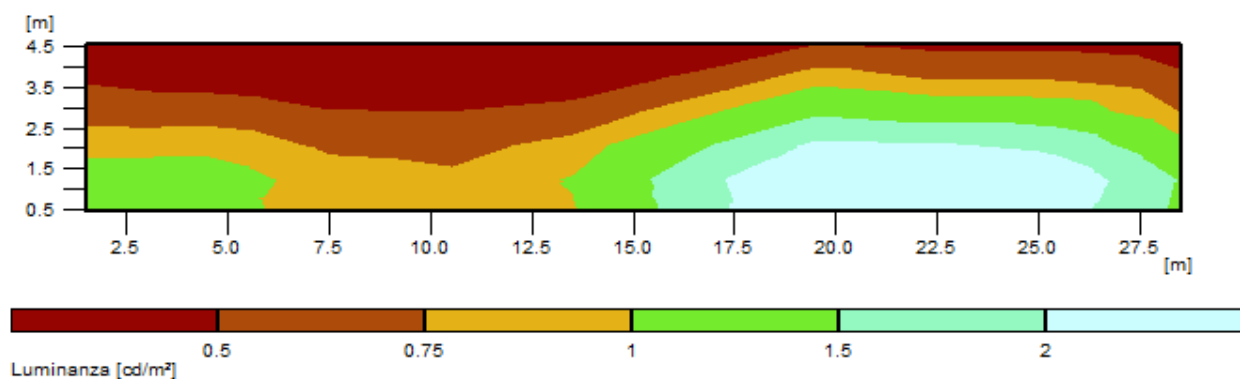
The results obtained in terms of energy performance and lighting requirements are summarized in Table 4.

Table 4. Results obtained for the Road Section n. 3.

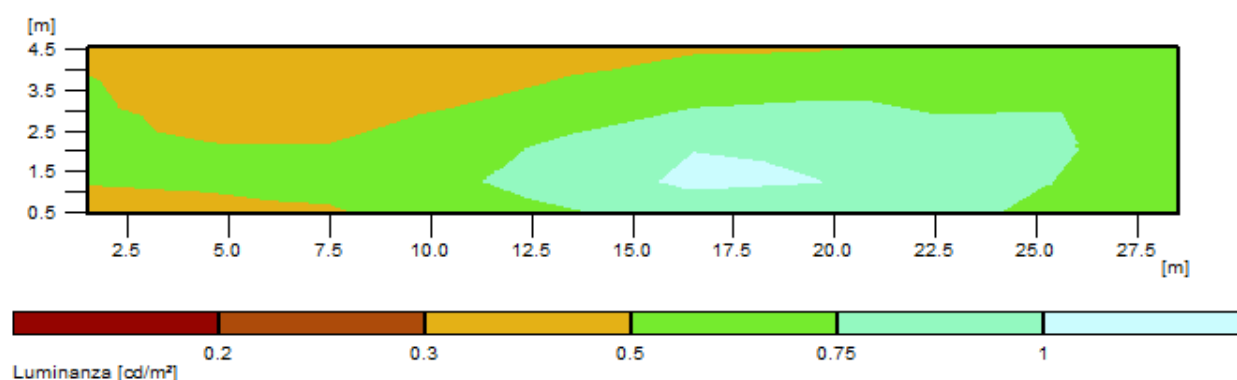
Energy and Lighting quantities	Current state		Optimization scenario		Required value
	Lane 1	Lane 2	Lane 1	Lane 2	
Number of luminaires	24		24		-
Power [W]	100		32		-
Luminous flux [lm]	6599		3609		-
Luminous efficacy [lm/W]	66.0		112.8		-
Total power [W]	2400		768		-
Average road surface luminance (L_{av}) [$cd \cdot m^{-2}$]	1.02	1.04	0.58	0.61	≥ 0.50
Overall uniformity (U_o)	0.23	0.23	0.52	0.51	≥ 0.35
Longitudinal uniformity (U_l)	0.29	0.38	0.74	0.91	≥ 0.40
Overall uniformity with wet road surface condition (U_{ow})	0.17	0.17	0.30	0.29	≥ 0.15
Threshold increment (f_{TI}) [%]	4	2	7	6	≤ 15
Edge illuminance ratio (R_{EI})	0.40	0.40	0.49	0.49	≥ 0.30

* The lighting requirements satisfied are highlighted in green color, while the requirements not satisfied are in red color.

The current lighting system does not meet the standard for the overall and longitudinal uniformity, due to an incorrect luminance distribution; the optimization scenario allowed a remarkable energy saving and a better luminance distribution, as shown in Figure 9.

Figure 9. Luminance distribution with the current lighting system.

The luminance distribution for the proposed optimization scenario is more homogeneous, as shown in Figure 10.

Figure 10. Luminance distribution with the optimization scenario.

Therefore, the replacement of the lamps allowed, also in this case, both a reduction of the installed power and a better lighting performance, satisfying the lighting requirements provided by the standard EN 13201-2.

For the sake of simplicity, since the models of the other road sections are similar to those presented so far, they are not reported in detail, but only in the overall energy and environmental assessment analyzed in the following section.

4.4. Energy and Environmental Results

Based on the entire RLS of the municipality, the comparison between current and optimized systems allowed to evaluate the energy savings obtainable and the greenhouse gas avoidable. For this purpose, the analysis of the annual operating hours of the plant was carried out on the basis of the data provided in [10], i.e. the conventional switch-on/off hours with reference to the central geographical area, according to which the annual operating hours are equal to 4196 hrs. Therefore, the total energy savings achievable with the energy efficiency measures are summarized in the Table 5.

Table 5. Energy results.

	<i>Current state</i>			<i>Optimization scenario</i>			<i>Results</i>		
<i>Road section</i>	<i>Electric power [W]</i>	<i>Energy consumption [kWh/yr]</i>	<i>CO2 emissions [kg]</i>	<i>Electric power [W]</i>	<i>Energy consumption [kWh/yr]</i>	<i>CO2 emissions [kg]</i>	<i>Energy saving [kWh/yr]</i>	<i>Energy saving [%]</i>	<i>CO2 avoided [kg]</i>
1	840	3525	1703	487.2	2044	987	1480	42.0	716
2	2800	11749	5675	585.2	2456	1186	9293	79.1	4489
3	2400	10071	4864	768.0	3223	1557	6848	68.0	3307
4	3900	16365	7885	815.1	3420	1652	12945	79.1	6233
5	2500	10490	5067	752.4	3157	1525	7333	69.9	3542
6	2100	8812	4256	852.6	3578	1728	5234	59.4	2528
7	2400	10071	4864	768.0	3223	1557	6848	68.0	3307
8	2550	10700	5168	271.7	1140	551	9560	89.3	4617
TOTAL	19490	81782	39482	5300	22240	10743	59542	72.8	28739

The energy savings that can be achieved, also has a positive impact on the environment, as a lower energy consumption determines lower CO₂ emissions. Since the RLS is connected to the national electric network, the emission factor for consumed electricity was assumed equal to 0.483 t CO₂/MWh_e, as indicated in the SEAP (Sustainable Energy Action Plan) Technical Annex [11].

Therefore, the total amount of CO₂ emissions avoidable resulted equal to 28.7 t CO₂/yr.

5. Conclusions

In this work, the lighting system of a municipal road network was analyzed by means of lighting simulation models via Relux software. The aim of the work was to define the current lighting system performance and intervention proposals for lighting efficiency improvement. The analysis was performed both to evaluate lighting requirements, following the standard EN 13201-2, and energy consumption.

The results, obtained by comparing current and optimized lighting systems, have highlighted the energy and environmental results achievable. In fact, the results obtained showed a strong energy saving potential (from 81.7 MWh/yr for the current state to 22.2 MWh/yr for the new lighting system solutions) equal to 72.8%. In terms of greenhouse gas emissions, the solutions hypothesized allowed to achieve 28.7 ton/yr of CO₂ avoided.

Therefore, this work has allowed to observe that the energy optimization margins of a public lighting system can be very high, and their quantification is achievable through an engineering approach based on lighting modelling techniques.

Future developments of this work will allow to analyze the effects obtainable by considering modernization of the electric power lines and the installation of lighting control systems from a Smart City perspective, also taking into account light pollution.

References

1. Cottone, N. Illuminazione pubblica: in Italia costa cinque volte più della Germania. *Il Sole 24 Ore* **22 maggio 2018**. https://www.ilsole24ore.com/art/notizie/2018-05-21/illuminazione-pubblica-italia-costa-cinque-volte-piu-germania-211346.shtml?uuid=AEp3i7rE&refresh_ce=1 (last accessed 22 February 2019).
2. Cottarelli, C.; Valdes, C.; Bonata, D.; Falchi, F.; Furgoni, R. Illuminazione pubblica: Spendiamo troppo. Osservatorio CPI (conti pubblici italiani), Università Cattolica del Sacro Cuore, 21 maggio **2018**.
3. Bellia, L.; Fragliasso, F.; Stefanizzi, E. Why are daylight-linked controls (DLCs) not so spread? A literature review. *Building and Environment* **2016**, 106, 301-3012.
4. de Rubeis, T.; Muttillio, M.; Pantoli, L.; Nardi, I.; Leone, I.; Stornelli, V.; Ambrosini D. A first approach to universal daylight and occupancy control system for any lamps: Simulated case in an academic classroom. *Energy and Buildings* **2017**, 152, 24-39.
5. de Rubeis, T.; Nardi, I.; Muttillio, M.; Ranieri, S.; Ambrosini D. Room and window geometry influence for daylight harvesting maximization – Effects on energy savings in an academic classroom. *Energy Procedia* **2018**, 148, 1090-1097.
6. Boyce, P. R. The benefits of light at night. *Building and Environment* **2019**, 151, 356-367.
7. Suk, J.Y.; Walter, R.J. New Nighttime Roadway Lighting Documentation Applied to Public Safety at Night: A Case Study in San Antonio, Texas. *Sustainable Cities and Society* **2019**, 46, 101.
8. UNI EN 13201-2. Illuminazione stradale - Parte 2: Requisiti prestazionali, **2016**.
9. Maamari, F.; Fontoynt, M.; Adra, N. Application of the CIE test cases to assessthe accuracy of lighting computer programs, *Energy and Buildings* **2006**, 38, 869–877.
10. Conventional determination of electricity withdrawal profiles corresponding to untreated public lighting users on an hourly basis, Annex A, **2008**. ARERA – Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente. <https://www.arera.it/it/docs/08/029-08arg.htm> (last accessed 14.05.2019).
11. Technical annex to the SEAP template instructions document: THE EMISSION FACTORS. https://www.eumayors.eu/IMG/pdf/technical_annex_en.pdf (last accessed 14.05.2019).

XIX Congresso Nazionale CIRIAF

Energia e Sviluppo Sostenibile

Carbohydrates recovery from cardoon pretreated by acid-catalyzed steam explosion and enzymatic hydrolysis

A. Bertini^{1,*}, M. Gelosia¹, G. Cavalaglio¹, M. Barbanera², T. Giannoni¹, G. Tasselli¹, Prof. Ing. A. Nicolini¹ and Prof. Ing. F. Cotana¹

¹ CIRIAF-CRB section- University of Perugia via G. Duranti,63, 06125 Perugia Italy

² University of Tuscia, Largo dell'Università, s.n.c., Loc. Riello, 01100, Viterbo, Italy

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: bertini@crbnet.it

Abstract: Cardoon (*Cynara cardunculus*) is a promising crop for obtaining oil from seeds and lignocellulosic residues. Lignocellulosic residues are a source of hexose and pentose carbohydrates derived from cellulose and hemicellulose that can be used as feedstock for industrial microbiology processes. In order to obtain fermentable carbohydrates, lignocellulosic residues have to undergo an effective pre-treatment. Among pre-treatments, acid-catalyzed steam explosion is a thermochemical process capable of releasing free pentose carbohydrates into a liquid fraction, and at the same time making the cellulose-rich solid fraction easily hydrolyzed by enzymes. The drawback is the production of a high number of carbohydrate degradation products which are present in the liquid fraction and could inhibit microbial growth. This liquid fraction can be further exploited through the optimization of pre-treatment conditions, minimizing inhibitor production while maximizing monosaccharides recovery. In this work the lignocellulosic residues of cardoon, gathered from a dedicated field, were used as raw material for the production of fermentable monosaccharides by employing acid-catalyzed steam explosion. The raw material was soaked with a dilute (1% w/w) sulfuric acid solution and then subjected to steam explosion at three different severity conditions. The recovered slurry was separated into solid and liquid fractions and individually characterized in order to determine total carbohydrates and inhibitor concentrations. The slurry and the washed solid fraction underwent enzymatic hydrolysis to release glucose from cellulose and pentose monosaccharides from hemicellulose. By conducting the pre-treatment at 175°C for 35 minutes and hydrolyzing the obtained slurry a yield of 33.17 g of monosaccharides/ 100 g of cardoon was achieved. At the same conditions, 4.39 g of inhibitors/ 100 g of cardoon were produced.

Keywords: Biomass; Cardoon; Acid-catalyzed steam explosion; Enzymatic hydrolysis

1. Introduction

Cardoon (*Cynara cardunculus*) is an herbaceous perennial plant in the *Asteraceae* family [1]. It is a naturally occurring species comprised of many cultivated forms, which is also able to grow in regions with dry climates [2]. Because of these properties, many cultivars of cardoon are exploited for the production of biomass and oils, extracted from the seeds of the plant, which are potential building blocks for the manufacture of bioplastic and biofuels. Cardoon biomass is mainly made of hemicellulose, cellulose and lignin. These components together form a complex matrix called lignocellulose [3]. Lignin is a polymer rich in phenols, while cellulose and hemicellulose are two polysaccharides rich in hexose and pentose monomers respectively [4]. The lignocellulosic biomass can be efficiently employed as feedstock for industrial microbiology processes, but its use is complicated because the polysaccharide chains of both hemicellulose and cellulose are quite stable, making the carbohydrates not readily fermentable by microorganism [5]. In order to obtain fermentable carbohydrates, lignocellulosic biomass has to undergo treatments capable of hydrolyzing the cellulose and hemicellulose polymers. A first chemical-physical pre-treatment followed by an enzymatic hydrolysis treatment with cellulases and hemicellulases is the most common protocol used by both the research domain and industry [6]. Among pre-treatments, steam explosion is a thermochemical process capable of making the cellulose-rich solid fraction (SF) easily hydrolyzed by enzymes [7]. Unfortunately, with this process conditions, almost all of the hemicellulose carbohydrates are degraded into unwanted compounds such as 5-Hydroxymethylfurfural (5-HMF), 2-Furaldehyde, levulinic and formic acids, while hemicellulose acetyls are converted into acetic acid [8]. These compounds are strong inhibitors of microbial growth and they collect into the liquid fraction (LF) of the steam explosion. Due to the inhibitors and low content of hemicellulose-derived carbohydrates, the LF is barely employment in industrial fermentation [9]. The sulfuric acid-catalyzed steam explosion could represent a solution to this problem since it enables the recovery of a huge amount of monomeric hemicellulose carbohydrates into the LF, keeping at the same time inhibitor production and cellulose digestibility potentially unchanged [10]. In addition, in presence of an acid catalyst, process severity (time and temperature) is decreased, improving the overall economics of the process [11]. Finally, a great process simplification could be achieved by removing the solid and liquid separation step of the slurry obtained after steam explosion. So the whole slurry could directly use for the enzymatic hydrolysis treatment [12]. Anyway this last scenario should be further investigated since the cellulolytic enzymes activity could be inhibited by xylooligosaccharides [13] and lignin derivatives [14] released into the LF of slurry, thus decreasing the enzymatic hydrolysis yield of cellulose.

In this work, the lignocellulosic residues of cardoon, gathered from a dedicated field in Porto Torres (SS), were used as raw material for the production of fermentable monosaccharides by employing acid-catalyzed steam explosion followed by an enzymatic hydrolysis treatment. The raw material was pre-soaked with a dilute (1% w/w) sulfuric acid solution and then subjected to steam explosion at three different severity conditions in order to minimize inhibitor production and maximize carbohydrates recovery. The recovered slurry was separated into solid and liquid fractions

and individually characterized for carbohydrates and inhibitor concentrations. Both the slurry and the washed SF underwent enzymatic hydrolysis in order to obtain a monosaccharides-rich hydrolysate.

2. Materials and methods

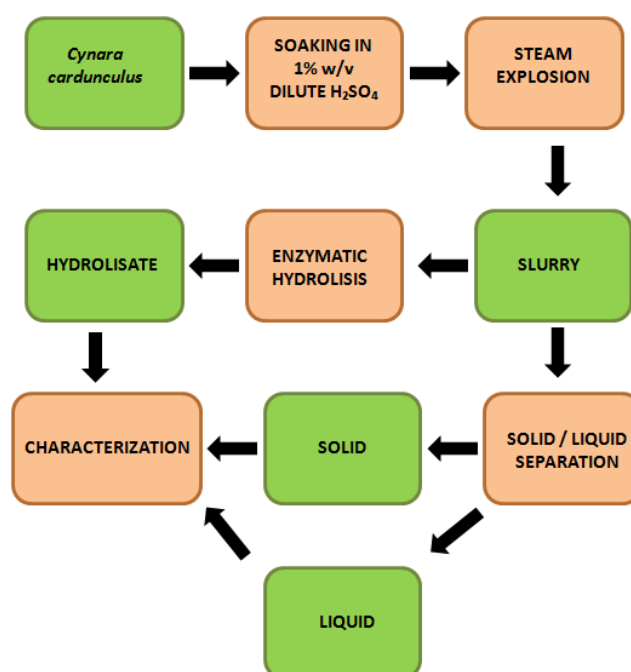
All the reagents utilized in this work are analytical grade and were purchased from Sigma-Aldrich. The Cellic® CTec2 enzymatic cocktail was provided by Novozymes. Deionized water was used as the only solvent.

All the samples were characterized according to the National Renewable Energy Laboratory (NREL, Golden, CO, USA) analytical methods for biomass in order to evaluate their composition [15]. The moisture analysis of solid samples was performed using a Mettler Toledo HB43-S Halogen Classic plus. Monosaccharides and inhibitors were analyzed using an UHPLC (Thermo Fisher Dionex Ultimate 3000) equipped with a refraction index detector (ERC RefractoMax 520) and a Bio-Rad Aminex HPX-87H column [16].

2.1 Process flowchart

The overall experimentation phases are reported in Figure 1.

Figure 1: Overall process of hydrolysates production and characterization of *Cynara cardunculus*.



2.2 Raw material

Cynara cardunculus (Figure 2) stems were kindly provided from Matrica S.p.A. (Porto Torres, Italy). Stems and flower heads were harvested together and subsequently separated and chipped with an industrial chipper, obtaining a heterogeneous mix of woodchips (200-250mm). The water content of the chipped raw material was 8.79%.

Figure 2: *Cynara cardunculus*

The chipped biomass was soaked overnight in a sulphuric acid solution (1% w/w). The solid/liquid ratio used for biomass soaking was 1:10, that allowed uniform contact between biomass and acid solution, as seen from literature data [17]. Subsequently the biomass was removed from acid bath, drained and underwent to steam explosion treatment.

2.3 Steam explosion

Steam explosion pre-treatment was carried out in a pilot-scale reactor of 11 L. The feedstock was pre-treated at three different temperatures and fixed residence time, as shown in Table 1.

Table 1: Pre-treatment conditions

Sample Name	Temperature (°C)	Time (min)
CA1	160	35
CA2	175	35
CA3	190	35

A time of residence of 35 minutes was chosen in order to promote the hydrolysis of hemicellulose into the reactor and, at the same time, avoid to dilute too much the resulting slurry with the incoming steam [18]. Following the pre-treatment, the recovered material (slurry) was split in two equal parts. A solid/liquid separation was performed in one of the two parts and resulting SF and LF were characterized for carbohydrates (cellulose, hemicellulose) and inhibitors content. The SF was then washed and subjected to enzymatic hydrolysis. The part collected as slurry was also subjected to enzymatic hydrolysis.

Cellulose and hemicellulose recovery into SF and LF after pre-treatment was evaluated by using the following equation (1)

$$\% \text{ Recovery} = \frac{\text{Cellulose or Hemicellulose into SF or LF (g)}}{\text{Cellulose or Hemicellulose in raw material (g)}} \quad (1)$$

2.4 Enzymatic hydrolysis

Enzymatic hydrolysis was carried out on both the washed SF and the slurry.

The process was carried out on a laboratory scale using 100 ml flasks. In order to assess the best pretreatment conditions, the enzymatic hydrolysis was carried out at low solid loading (5% w/w) and high enzyme loading (30% w enzyme/w cellulose). The final volume of each trail was set to 50 ml and was obtained using a 45 mM citrate buffer solution (pH 5.0). The reaction was conducted into a thermostatic chamber at 50°C and under shaking condition using an orbital shaker (Phoenix Instrument RS-OS 10) set at 180 RPM for 72 hours. The resulting hydrolysates were characterized for monosaccharides content by UHPLC and enzymatic hydrolysis yield (HY) was evaluated by using the following equation (2)

$$\% \text{ HY} = \frac{\text{Glucose (g/L)} * V_{\text{final}} \text{ (L)}}{\text{Cellulose in SF (g)}} \quad (2)$$

In order to assess the contribution of the carbohydrates present into LF on the final HY of slurry, the LF were subjected to enzymatic hydrolysis at the same condition of SF. The results obtained were used as “blanks” for the slurry hydrolysis process.

3. Results and discussion

3.1 Characterization of raw material, SL and LF

The starting biomass was characterized in order to determine its cellulose, hemicellulose and lignin content for the evaluation of yields of further performed analysis as shown in the following Table.

Table 2: Chemical composition of *Cynara cardunculus* stems.

Hemicellulose	Cellulose	Acetyls	Pectins	Lignin	Extractives	Total
15.81%	28.11%	4.62%	4.38%	13.08%	7.64%	82.43%

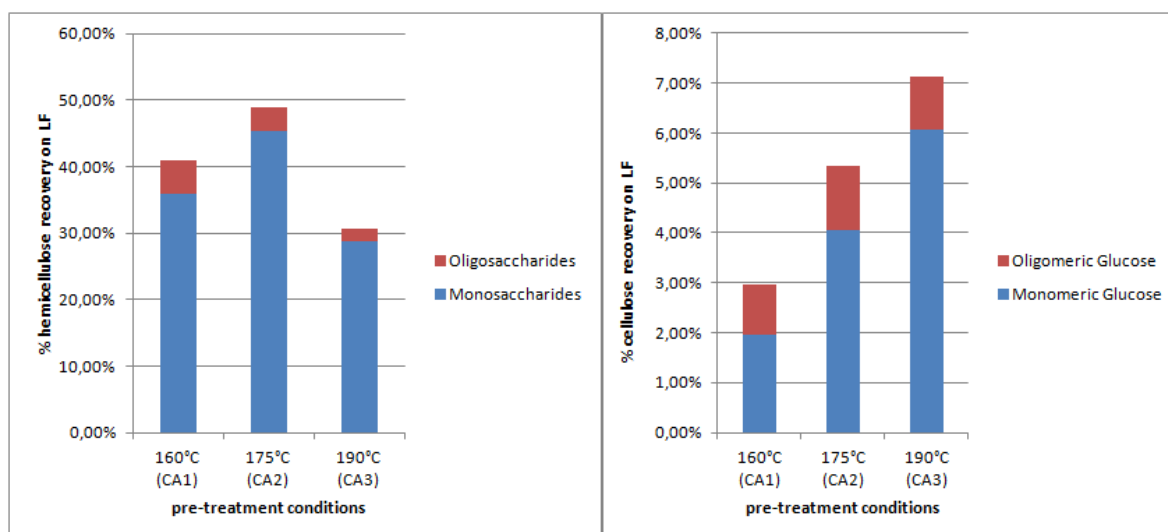
The three acid-catalyzed steam explosions were carried out three different temperature (160°C, 175°C and 190°C), producing three different SFs and LFs, namely CA1, CA2 and CA3. The goal of

biomass pretreatment is to remove as much hemicellulose as possible, recovering its sugars from the LF and to enrich the cellulose content in the SF, making it more susceptible to enzymatic hydrolysis. Table 3 reports the SF and LF characterization in terms of cellulose and hemicellulose content (C_{solid} and H_{solid}) and their recovery in the LF (HR_{liquid} and CR_{liquid}) and in the SF (HR_{solid} and CR_{solid}).

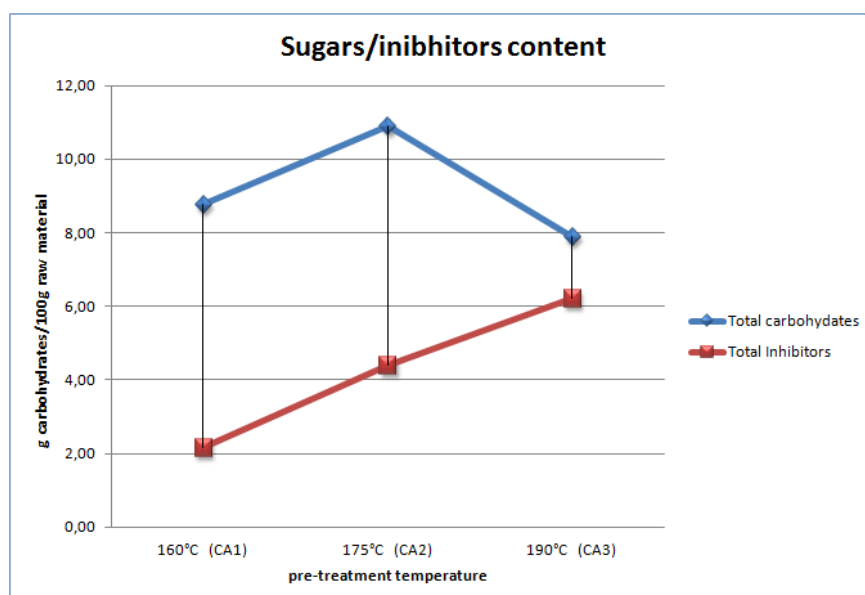
Table 3: Carbohydrates content in the SF and LF and cellulose and hemicellulose recovery.

Sample	H_{solid}	C_{solid}	HR_{solid}	CR_{solid}	HR_{liquid}	CR_{liquid}	HR_{total}	CR_{total}
CA1	9.44%	55.43%	26.33%	86.93%	41.02%	2.95%	67.34%	89.88%
CA2	5.46%	57.27%	16.49%	87.56%	48.80%	4.28%	65.29%	91.84%
CA3	3.61%	56.25%	8.87%	77.71%	30.69%	7.14%	39.56%	84.85%

As expected, at the lowest temperature the SF of ample CA1 contained less cellulose (55.43%) than the other samples, as well as a higher hemicellulose content (9.44%). An enrichment in cellulose into the SF was observed in the CA2 sample, which bears the highest concentration of cellulose among the considered samples. CA3 showed the lowest hemicellulose content of all samples and also showed a lower cellulose content than CA2. At the highest temperature the cellulose and hemicellulose content inside the SF decreased since hexose and pentose sugars were converted into degradation production due to the harsh treatment conditions. This consideration is supported by total cellulose and hemicellulose recovery values, which decreased at increasing working temperatures, especially for hemicellulose. A 67.34% of total hemicellulose recovery was obtained with sample CA1, but about 40% of the hemicellulose was found to be in the SF. The best result in terms of hemicellulose recovered into the LF was achieved with sample CA2 (48.80 %), which also showed a total hemicellulose recovery of 65.29%. In addition, sample CA2 showed the highest total cellulose recovery (91.84 %). The recovery of monomeric and oligomeric hemicellulose and cellulose in the LF, with respect to their raw material content, is reported in Figure 3. In theory, an effective pretreatment should hydrolyze the raw material polymer into monomeric sugars. Due to its crystalline properties, only a small amount of cellulose was hydrolyzed into the LF, and for each sample the oligomeric form was higher than the monomeric form, suggesting the necessity of performing an enzymatic hydrolysis treatment of the SF. The highest cellulose recovery (7.14%) was achieved with sample CA3, followed by CA2 (4.28%). However, these values were higher than the ones obtained by a non-catalyzed steam explosion [19]. On the contrary, the use of an acid as catalyst allowed to recover a high amount of hemicellulose into LF, with a maximum reached by CA2 (48.80%). In addition, about 90% of hemicellulose was present in monomeric form, meaning that the sugars are already usable for subsequently fermentation. In a previous study performed on cardoon without the use of an acid catalyst, *Gelosia et al.* [19] recovered only 25% of hemicellulose sugars in the LF and 50% of it was in oligomeric form.

Figure 3: Mono- and oligo-saccharides of cellulose and hemicellulose recovered into LF

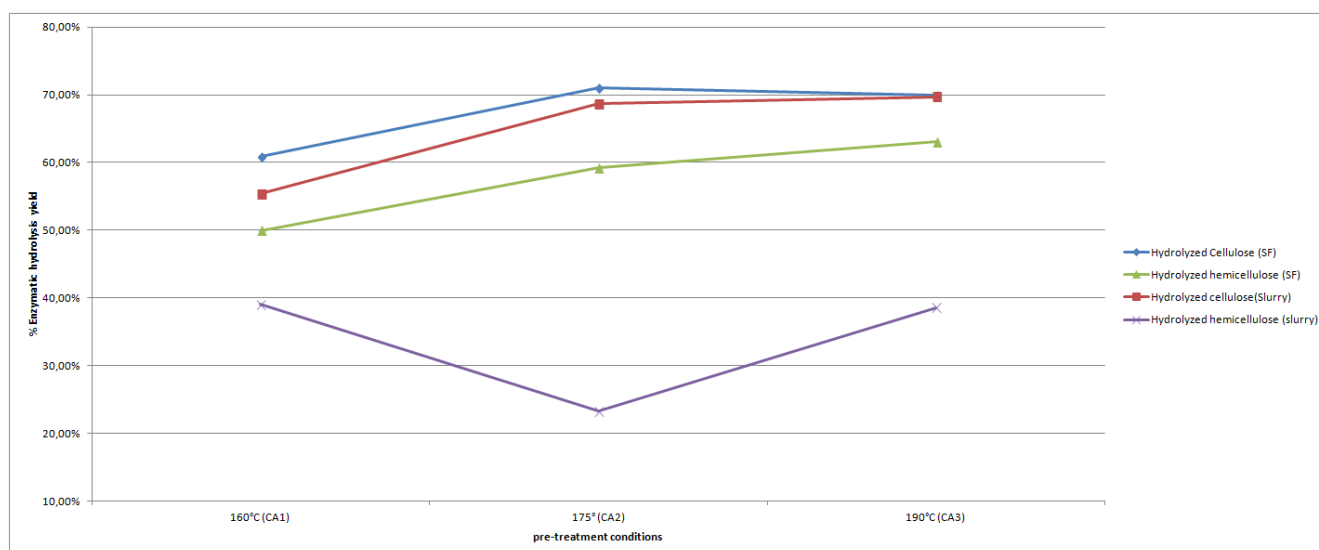
As showed in Figure 4, the total monosaccharides content of the LF appeared to drop after reaching 175°C, despite the fact that a higher amount of hemicellulose was hydrolyzed at 190 °C (Table 3). A steady increasing trend was instead observed for the inhibitor content, meaning that thermal degradation reactions of carbohydrates occurred at every temperature tested. A good balance between monosaccharides recovery and inhibitors production was achieved at both 160°C and 175 °C, while at 190 °C the degradation reactions were predominated over hemicellulose hydrolysis. Maximum carbohydrates recovery and minimum inhibitor production was achieved at 175°C and 160°C, respectively. Total inhibitors production was lower than that obtained in other similar studies on biomass pretreatment; therefore, the liquid could be successfully employed as feedstock for microbial processes such as lipid accumulation and biogas production. Anyway, further experiments on microorganism tolerance to inhibitors should be performed to confirm this last hypothesis.

Figure 4: Monosaccharides and inhibitors content into LF at different pre-treatment conditions

3.2. Enzymatic hydrolysis

Enzymatic hydrolysis was performed on both the washed SF and slurry of each sample in order to test potential inhibitory effects of the liquid on enzymes activity. Inhibitors that reduce the hydrolysis activity of enzymes are released during the pretreatment step into the LF. The main inhibitors are phenols, xyloligosaccharides, and monosaccharides (end product inhibition effect) [20] [13]. Figure 5 shows the final yield of the enzymatic hydrolysis of cellulose and hemicellulose. About 70% of cellulose was hydrolyzed in the samples CA2 and CA3, suggesting that a maximum hydrolysis yield was achieved at 175° C. The same samples showed a similar result in terms of hydrolyzed hemicellulose (59.27% and 63.05%, respectively). The slurry of each sample showed to a similar extent in terms of cellulose hydrolysis, with a slight difference between the SF and the slurry that decreased at increasing temperatures. These positive achievements suggest that no inhibitory effects are present during cellulose hydrolysis of the slurry performed with a pre-treatment temperature equal to or higher than 175°C. On the contrary, a huge inhibition effect was observed for the hydrolysis of slurry-related hemicellulose, with maximum reduction of the yield observed for CA2 (about a 50% loss), probably due to a higher content of mono- and oligo-saccharides (Figure 3). However, only 16.49% and 8.87% of the initial hemicellulose was still present in the samples CA2 and CA3, respectively.

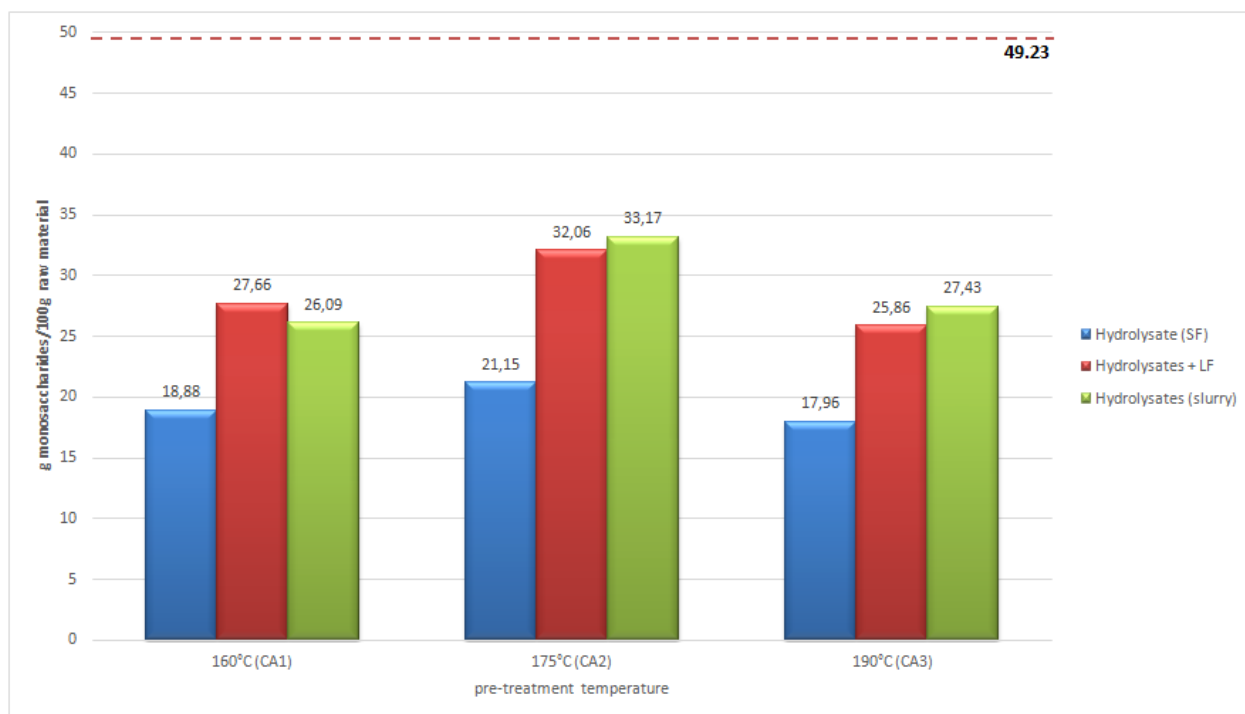
Figure 5: Enzymatic hydrolysis yields of cellulose and hemicellulose for both SF and slurry



Total sugars yield achieved after acid-catalyzed steam explosion of cardoon, followed by enzymatic hydrolysis step, was reported in figure 6. Three different setups were considered: monosaccharides recovery in the SF hydrolysate, monosaccharides recovery in the SF hydrolysate and in the LF, and monosaccharides recovery in the slurry hydrolysate. CA2 showed a higher monosaccharides recovery for all the considered setups than the other two samples. The best result was achieved with a pre-treatment conducted at 175°C, followed by enzymatic hydrolysis of the resulting slurry, allowing the recovery of 67.4% of the monosaccharides initially present in the raw material (represented by the dashed line in the figure 6). This is a 57% improvement over the hydrolysis of the SF alone and a

higher monosaccharides recovery than that obtained from the hydrolysates of SF and LF separately. In conclusion, it was found that removing the need of separating the liquid from the solid fraction before the enzymatic hydrolysis step could streamline the overall process of monosaccharides production. These results were analogous to those obtained in another work with a similar cardoon pretreatment and [21] better than those obtained without acid-catalyzed steam explosion of cardoon[19].

Figure 6: Total monosaccharides recovery after pre-treatment and enzymatic hydrolysis.



4. Conclusions

In this work *Cynara cardunculus* was used as the raw material for the optimization of monosaccharides recovery after steam explosion and enzymatic hydrolysis. By conducting the pre-treatment at 175 °C for 35 minutes and using biomass that was previously chipped and soaked in a dilute sulfuric acid (1% w/w) solution, it was possible to recover in the liquid fraction a good amount of monosaccharides (10.91 g/ 100 g raw materials), maintaining inhibitors production low (4.39 g/ 100 g raw material). Enzymatic hydrolysis was conducted on the recovered SF, yielding 70.98% of cellulose and 59.27% of hemicellulose. Furthermore, the enzymatic hydrolysis step showed that using the recovered slurry it was possible to achieve the same enzymatic hydrolysis yield achieved with the washed solid fraction. A yield of 33.17 g of monosaccharides/100 g of cardoon, equal to 67.4% of maximum theoretical yield, was achieved by hydrolyzation of the slurry of sample CA2. The removal of the separation step can lead to an overall process simplification. Future works will focus on employing the recovered slurry hydrolysates in microbial growth tests for both the production of bioethanol and lipid accumulation in oleaginous yeasts.

5. Acknowledgments

All activities were performed according to the guidelines of the “Biofeedstock” P.O.N. We would also like to thank Matrica for providing the cardoon biomass and Novozymes for providing the enzymatic cocktails used in the experimentation.

6. References

1. Cajarville, C.; González, J.; Repetto, J.; Alvir, M.; Rodríguez, C. Nutritional evaluation of cardoon (*cynara cardunculus*) seed for ruminants. *Animal feed science and technology* **2000**, *87*, 203-213.
2. Angelini, L.G.; Ceccarini, L.; Di Nasso, N.N.; Bonari, E. Long-term evaluation of biomass production and quality of two cardoon (*cynara cardunculus* L.) cultivars for energy use. *Biomass and bioenergy* **2009**, *33*, 810-816.
3. Ciancolini, A.; Alignan, M.; Pagnotta, M.A.; Vilarem, G.; Crinò, P. Selection of italian cardoon genotypes as industrial crop for biomass and polyphenol production. *Industrial crops and products* **2013**, *51*, 145-151.
4. Francaviglia, R.; Bruno, A.; Falcucci, M.; Farina, R.; Renzi, G.; Russo, D.E.; Sepe, L.; Neri, U. Yields and quality of *cynara cardunculus* L. Wild and cultivated cardoon genotypes. A case study from a marginal land in central Italy. *European journal of agronomy* **2016**, *72*, 10-19.
5. Kumar, R.; Singh, S.; Singh, O.V. Bioconversion of lignocellulosic biomass: Biochemical and molecular perspectives. *Journal of industrial microbiology & biotechnology* **2008**, *35*, 377-391.
6. Mosier, N.; Wyman, C.; Dale, B.; Elander, R.; Lee, Y.; Holtzapple, M.; Ladisch, M. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource technology* **2005**, *96*, 673-686.
7. Hendriks, A.; Zeeman, G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource technology* **2009**, *100*, 10-18.
8. Jacquet, N.; Maniet, G.; Vanderghem, C.; Delvigne, F.; Richel, A. Application of steam explosion as pretreatment on lignocellulosic material: A review. *Industrial & Engineering Chemistry Research* **2015**, *54*, 2593-2598.
9. Palmqvist, E.; Hahn-Hägerdal, B. Fermentation of lignocellulosic hydrolysates. II: Inhibitors and mechanisms of inhibition. *Bioresource technology* **2000**, *74*, 25-33.
10. Ballesteros, M.; Negro, M.J.; Manzanares, P.; Ballesteros, I.; Sáez, F.; Oliva, J.M. Fractionation of *cynara cardunculus* (cardoon) biomass by dilute-acid pretreatment. In *Applied biochemistry and biotechnology*, Springer: 2007; pp 239-252.
11. Schell, D.; Torget, R.; Power, A.; Walter, P.; Grohmann, K.; Hinman, N. A technical and economic analysis of acid-catalyzed steam explosion and dilute sulfuric acid pretreatments using wheat straw or aspen wood chips. *Applied biochemistry and biotechnology* **1991**, *28*, 87.
12. Bondesson, P.-M.; Galbe, M.; Zacchi, G. Ethanol and biogas production after steam pretreatment of corn stover with or without the addition of sulphuric acid. *Biotechnology for biofuels* **2013**, *6*, 11.

13. Duarte, G.C.; Moreira, L.R.S.; Jaramillo, P.M.D.; F Filho, E.X. Biomass-derived inhibitors of holocellulases. *BioEnergy Research* **2012**, *5*, 768-777.
14. Jing, X.; Zhang, X.; Bao, J. Inhibition performance of lignocellulose degradation products on industrial cellulase enzymes during cellulose hydrolysis. *Applied biochemistry and biotechnology* **2009**, *159*, 696.
15. Sluiter, J.; Sluiter, A. Summative mass closure. *NREL, NREL/TP-510-48087* **2010**, 1-10.
16. Sluiter, A.; Hames, B.; Ruiz, R.; Scarlata, C.; Sluiter, J.; Templeton, D.; Crocker, D. Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass. *Laboratory analytical procedure* **2008**, *1617*, 1-16.
17. Tao, L.; Schell, D.; Davis, R.; Tan, E.; Elander, R.; Bratis, A. *Nrel 2012 achievement of ethanol cost targets: Biochemical ethanol fermentation via dilute-acid pretreatment and enzymatic hydrolysis of corn stover*; National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States): 2014.
18. Ballesteros, I.; Negro, M.J.; Oliva, J.M.; Cabañas, A.; Manzanares, P.; Ballesteros, M. In *Ethanol production from steam-explosion pretreated wheat straw*, Twenty-seventh symposium on biotechnology for fuels and chemicals, 2006; Springer: pp 496-508.
19. Cotana, F.; Cavalaglio, G.; Gelosia, M.; Coccia, V.; Petrozzi, A.; Ingles, D.; Pompili, E. A comparison between shf and sssf processes from cardoon for ethanol production. *Industrial Crops and Products* **2015**, *69*, 424-432.
20. Takagi, M. Inhibition of cellulase by fermentation products. *Biotechnol. Bioeng.;*(United States) **1984**, *26*.
21. Ballesteros, I.; Ballesteros, M.; Manzanares, P.; Negro, M.J.; Oliva, J.M.; Sáez, F. Dilute sulfuric acid pretreatment of cardoon for ethanol production. *Biochemical Engineering Journal* **2008**, *42*, 84-91.

XIX Congresso Nazionale CIRIAF

Energia e Sviluppo Sostenibile

Effetti della mitigazione ambientale sull'efficienza dell'impianto termico

Matteo Di Grazia ^{1,*}, Cristina Piselli ^{1,2} and Anna Laura Pisello ^{1,2}

¹ CIRIAF – Università di Perugia, Via G. Duranti 63, 06125, Perugia, Italia

² Dipartimento di Ingegneria, Università di Perugia, Via G. Duranti 67, 06125, Perugia, Italia

* Autore di riferimento. E-mail: digrazia@crbnet.it

Abstract: Il cambiamento climatico incide negativamente sulle prestazioni energetiche degli impianti termici che nella maggior parte dei casi operano al di fuori delle condizioni di progetto con pessimi risultati in termini di efficienza energetica. Infatti, durante i mesi estivi l'aumento della temperatura esterna influisce significativamente sul funzionamento dei condizionatori d'aria riducendone le prestazioni energetiche, aumentando il consumo energetico e il relativo impatto ambientale. Per questo motivo, le tecniche di mitigazione ambientale ed i materiali innovativi come i materiali riflettenti ad elevato albedo (*cool materials*) per l'edilizia potrebbero contribuire a ridurre gli effetti negativi migliorando il microclima con risultati positivi sul funzionamento degli impianti termici. Questo studio si concentra su una abitazione unifamiliare con impianto di climatizzazione estiva ad espansione diretta in due diverse condizioni al contorno, non mitigata e mitigata. La simulazione termoenergetica è eseguita tramite EnergyPlus ed il modello matematico del condizionatore d'aria è basato su curve biquadratiche ricavate dai dati del costruttore, che permettono di rappresentare il comportamento del sistema ad espansione diretta al variare della temperatura esterna ed interna. I risultati sono analizzati in termini di indice di efficienza energetica (EER) e di risparmio di energia finale per il sistema ad espansione diretta.

Keywords: Risparmio energetico, indice di prestazione energetica, EER, mitigazione ambientale, simulazione dinamica, influenza delle condizioni al contorno.

1. Introduzione

Il fenomeno dell'isola di calore urbana ha un forte impatto sulle prestazioni degli edifici e dei relativi impianti termici. Infatti, l'aumento dell'assorbimento della radiazione solare, le ridotte perdite di calore e il calore antropogenico si traducono in un bilancio termico positivo delle città e, quindi, in

temperature più elevate che influenzano la domanda e il consumo di energia per il raffrescamento [1]. Di conseguenza, il cambiamento climatico ha un impatto negativo sul consumo energetico e sulla domanda di picco di energia elettrica come descritto in [2] e influisce notevolmente sull'efficienza del condizionatore d'aria, aumentando al contempo il fabbisogno di raffrescamento degli edifici [3]. Le tecniche di mitigazione ambientale rappresentano delle tecnologie riconosciute per ridurre l'impatto di questi fenomeni legati al cambiamento climatico. Le strategie principali sono l'implementazione di sistemi evaporativi (specchi d'acqua), di materiali ad elevato albedo e del verde urbano [4].

In questo lavoro viene effettuata una simulazione energetica dinamica dell'edificio attraverso il motore di simulazione EnergyPlus per valutare la riduzione del consumo in raffrescamento e l'aumento dell'efficienza energetica del relativo impianto termico in estate dovuta all'implementazione di tecniche di mitigazione del microclima a livello di insediamento. A questo scopo, i files climatici vengono generati a partire da un lavoro precedente [5] sviluppato nell'ambito di un progetto di ricerca europea H2020 attualmente in corso e poi modificati con l'evidenza di altri studi relativi alle tecniche ed effetti della mitigazione ambientale [6].

Inoltre, per simulare il comportamento dell'impianto, viene utilizzato un modello matematico del sistema ad espansione diretta basato su curve di prestazione, funzione della temperatura dell'aria lato evaporatore e condensatore.

Pertanto, vengono studiati due scenari microclimatici (i) non mitigato e (ii) mitigato e vengono valutati e confrontati i risultati in termini di variazione del consumo energetico e dell'indice di efficienza energetica (EER) per il sistema ad espansione diretta.

2. Metodo

2.1 Creazione del file climatico con mitigazione ambientale

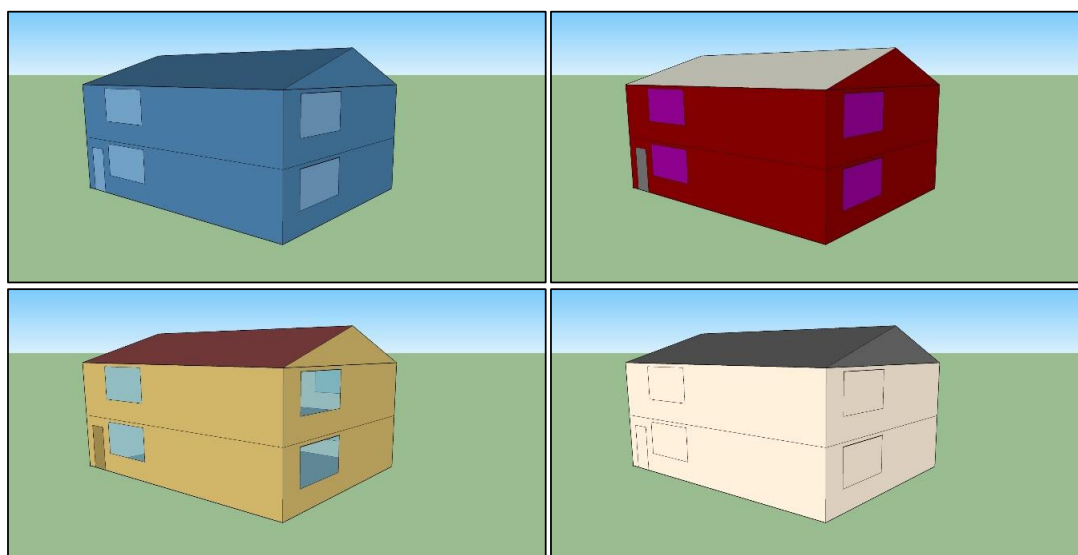
In un precedente lavoro descritto in [5], l'implementazione di strategie di mitigazione ambientale in uno specifico insediamento, quali l'aumento della percentuale di vegetazione e della capacità di riflettanza solare dell'ambiente costruito, viene analizzata tramite il software ENVI-met. In seguito, un file climatico è generato considerando il massimo effetto della combinazione delle due strategie di mitigazione a partire dai risultati della simulazione del microclima in termini di temperatura di bulbo asciutto, radiazione solare diretta e diffusa e velocità del vento per un giorno in estate e uno in inverno attraverso MATLAB, come dettagliato in [5]. La procedura applicata per la generazione del file climatico prevede l'interpolazione sinusoidale e lineare del rapporto tra i parametri ottimizzati e di riferimento su base giornaliera e annuale. Inoltre, applicando la stessa procedura, viene sviluppato anche il file climatico che rappresenta lo scenario di riferimento non mitigato. In questo lavoro, inoltre, il file climatico mitigato viene ulteriormente modificato in *Elements* (software di *BigLadder*) per considerare la possibile ulteriore riduzione dovuta all'implementazione di tecniche di mitigazione con sistemi evaporativi, considerando un abbassamento medio della temperatura di 2 K come media rappresentativa rispetto all'analisi effettuata in [6].

2.2 Caso studio: edificio reale e modello termo-energetico

La tipologia edilizia analizzata è una casa unifamiliare con una superficie lorda condizionata di circa 200 m², situata in Italia nel comune di Granarolo Dell'Emilia.

La forma dell'edificio è rettangolare con tetto inclinato e l'edificio soddisfa i requisiti della normativa italiana per gli edifici NZEB [7]. Poiché la definizione di edificio NZEB comprende al suo interno anche il sistema impiantistico, è stata seguita una procedura iterativa, che ad impianto termico modellato, permettesse di soddisfare il relativo requisito di fabbisogno di energia primaria per edifici NZEB partendo da un edificio di riferimento ed iterativamente modificando le proprietà termiche dell'involucro dell'edificio e del sistema impiantistico. I materiali scelti per l'involucro edilizio sono una muratura con isolamento in fibra di legno ad alta densità per la parete esposta a sud e con isolamento in fibra di legno a media densità per le altre pareti. Inoltre, il piano terra e il tetto sono isolati termicamente, quest'ultimo è anche altamente riflettente alla radiazione solare grazie alla presenza di materiali riflettenti sullo strato esterno. Le superfici trasparenti sono composte da finestre con triplo vetro e gas di riempimento in argon e presentano un sistema di schermatura per garantire il necessario ombreggiamento durante la stagione estiva. La figura 1 mostra il modello energetico dell'edificio in base alle condizioni al contorno, al tipo di costruzione, al tipo di superficie e alle zone termiche.

Figura 1. Modello termo-energetico a) condizioni al contorno, b) tipo di costruzione, c) tipo di superficie, d) zone termiche



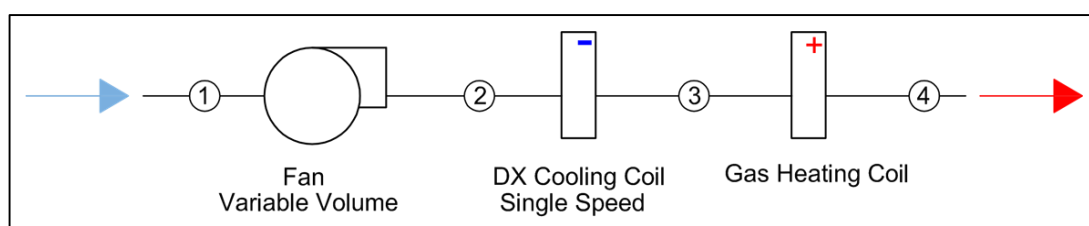
Ai fini del calcolo, l'edificio è composto da un'unica zona termica condizionata e da un locale non condizionato a livello del sottotetto. Parallelamente alla definizione delle proprietà geometriche e termiche dell'involucro edilizio, la caratterizzazione dei carichi termici interni è essenziale per il dimensionamento dell'impianto e per la valutazione energetica durante la stagione estiva. Oltre al profilo di occupazione dell'edificio, comprensivo di numero di persone e attività metabolica, sono definiti anche i carichi termici interni dovuti alle apparecchiature elettriche e all'illuminazione. Il contributo dei carichi interni si divide in calore radiante, sensibile e latente, quest'ultimo dove è

presente produzione di vapore (tipicamente in bagno e cucina). Il calcolo del carico termico di raffrescamento viene effettuato in condizioni di progetto al fine di mantenere la temperatura di comfort per la zona termica a 26°C con un UR intorno al 50% [8].

2.3 Modello dell'impianto termico

L'impianto termico è composto da un circuito aeraulico in cui sono presenti una batteria di riscaldamento a gas e una batteria di raffreddamento ad espansione diretta il cui funzionamento è al centro di questo studio. Pertanto, il sistema che serve la zona termica modellata è composto da un circuito ad aria con un ventilatore a volume variabile in configurazione di ricircolo e dalle due batterie sopra descritte. Il suo funzionamento è coadiuvato da un sistema ad aria esterna (DOAS) responsabile dei ricambi necessari per mantenere una buona qualità dell'aria interna. Il circuito aeraulico è rappresentato nella seguente figura 2.

Figura 2. Unità di trattamento aria



Il dimensionamento dell'impianto è stato effettuato rispetto alle due condizioni climatiche esterne inserite per il calcolo dei carichi termici, rispettivamente per l'inverno e per l'estate, e alle condizioni di progetto per l'immissione di aria in zona termica per entrambe le stagioni.

Dopo aver valutato i carichi termici in condizioni di picco e aver dimensionato l'impianto termico in base alla potenza termica necessaria per il riscaldamento e il raffrescamento, l'analisi termo-energetica dell'edificio si concentra sul funzionamento estivo. Poiché la tipologia dell'edificio è residenziale, per le condizioni di funzionamento dell'impianto si è scelta la modalità discontinua (on-off). Pertanto, l'attivazione del sistema è prevista dalla mattina alla sera e la temperatura di mandata dell'aria è inferiore di 10 °C rispetto alla temperatura di setpoint di zona e quindi pari a 16°C.

Il modello matematico utilizzato per rappresentare il funzionamento della batteria di raffrescamento ad espansione diretta si basa su curve di prestazione ottenute dai dati dichiarati dai produttori. Questo modello è definito come modello *black box* in [9], perché non rappresenta il comportamento fisico del componente HVAC.

Partendo dai dati di rendimento dichiarati, le curve di prestazione si ottengono in funzione della temperatura dell'aria esterna di bulbo asciutto in corrispondenza del condensatore e della temperatura interna di bulbo umido in corrispondenza dell'evaporatore.

Come descritto in dettaglio in [10], le curve di modifica della potenza frigorifera totale e del rapporto energia consumata (EIR), che sono funzione della temperatura, sono curve biquadratiche con due variabili indipendenti: la temperatura di bulbo umido dell'aria che entra nella batteria di raffreddamento e la temperatura di bulbo secco dell'aria che entra nella batteria del condensatore

raffreddato ad aria. L'output di queste curve viene moltiplicato rispettivamente per la potenza frigorifera totale nominale e l'EIR nominale per ottenere la potenza frigorifera totale e l'EIR alle specifiche temperature dell'aria in ingresso alle quali opera il gruppo ad espansione diretta.

Le curve biquadratiche per la potenza frigorifera totale e l'EIR sono rappresentate rispettivamente nell'Equazione 1 e nell'Equazione 2.

$$TotCoolCap = a_0 + a_1X + a_2X^2 + a_3Y + a_4Y^2 + a_5XY \quad (1)$$

$$EIR = a_0 + a_1X + a_2X^2 + a_3Y + a_4Y^2 + a_5XY \quad (2)$$

Dove X e Y rappresentano le due variabili e a_i i coefficienti delle curve da determinare. Le curve generate vengono quindi elaborate per garantire che il valore della curva sia pari ad 1 alle condizioni nominali stabilite da AHRI [11]. La bontà delle curve di prestazione è rappresentata dal parametro statistico coefficiente di determinazione R^2 che è il rapporto tra la somma delle deviazioni quadrate dei valori di fitting della curva dalla media e la somma delle deviazioni quadrate dei dati del costruttore dalla media. I migliori valori di R^2 sono prossimi all'unità.

Tabella 1. Parametri di modifica della curva di capacità di raffrescamento totale

0.9979	R^2
Biquadratica	Tipo di curva
<i>TotCoolCap</i>	Nome
1.0301960331	Coefficiente a_0 Costante
0.0288990678	Coefficiente a_1 X
0.0020749809	Coefficiente a_2 X^2
0.0033473744	Coefficiente a_3 Y
0.0000561771	Coefficiente a_4 Y^2
0.0004424811	Coefficiente a_5 XY
13.89	Valore minimo X
22.22	Valore massimo X
23.89	Valore minimo Y
51.67	Valore massimo Y
0.7363	Minimo curva Output
1.2123	Massimo curva Output
Temperatura	Unità di misura X
Temperatura	Unità di misura Y
Adimensionale	Unità di misura Output

3. Risultati

La simulazione del modello durante l'estate ha riguardato i mesi di giugno, luglio e agosto e i risultati per i due diversi scenari (i) non mitigato e (ii) mitigato sono confrontati in termini di potenza elettrica richiesta per il funzionamento del sistema ad espansione diretta e dell'indice di efficienza energetica (EER) del condizionatore. L'EER è valutato come il rapporto tra la potenza frigorifera totale fornita (effetto utile) e il consumo energetico del compressore (energia spesa).

Il confronto dei risultati dei due scenari mostra come, nello scenario mitigato, la mitigazione ambientale renda le condizioni microclimatiche favorevoli al funzionamento del climatizzatore, riducendo la differenza di temperatura tra pozzo caldo e freddo con un significativo incremento dell'efficienza energetica del sistema.

La figura 3 mostra la richiesta di potenza elettrica del compressore del sistema ad espansione diretta su base oraria. In questo grafico è possibile osservare la diminuzione della domanda di energia elettrica nello scenario mitigato durante il periodo di simulazione, cioè da giugno ad agosto. Inoltre, la figura 4 illustra la variazione dell'EER in entrambi gli scenari durante la settimana più calda di luglio. Per la condizione mitigata, l'EER durante le ore centrali della giornata rimane superiore allo stesso della condizione non mitigata. Infine, l'aumento dell'EER implica una diminuzione del consumo energetico per raffrescamento, come indicato nel grafico della figura 5 per i tre mesi estivi analizzati. La riduzione del fabbisogno energetico dell'edificio analizzato in modalità on/off è pari a 526 kWh, corrispondente ad un risparmio energetico percentuale per raffrescamento pari al 18,7%.

Figura 3. Potenza elettrica richiesta dal sistema ad espansione diretta

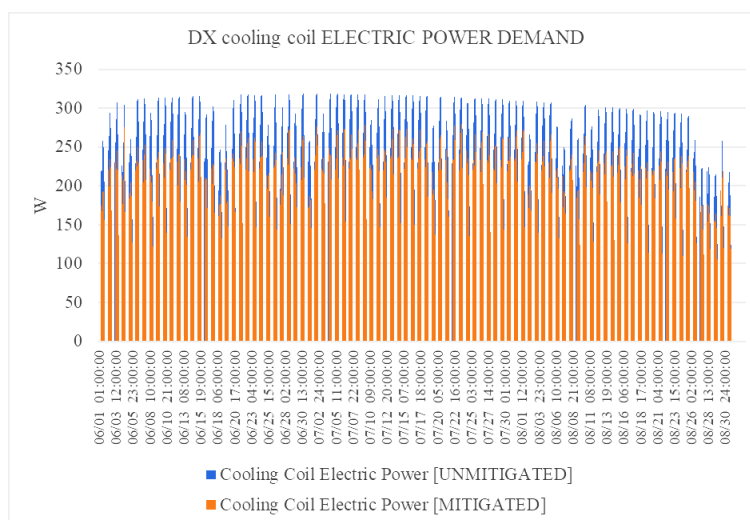


Figura 4. EER sistema ad espansione diretta

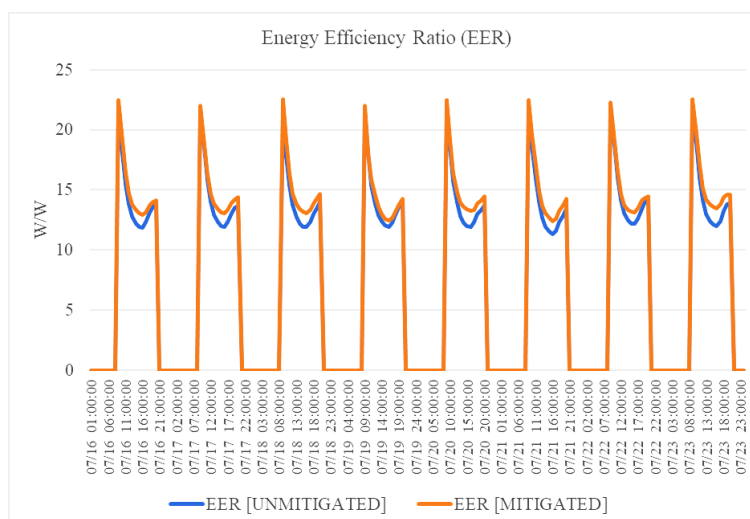
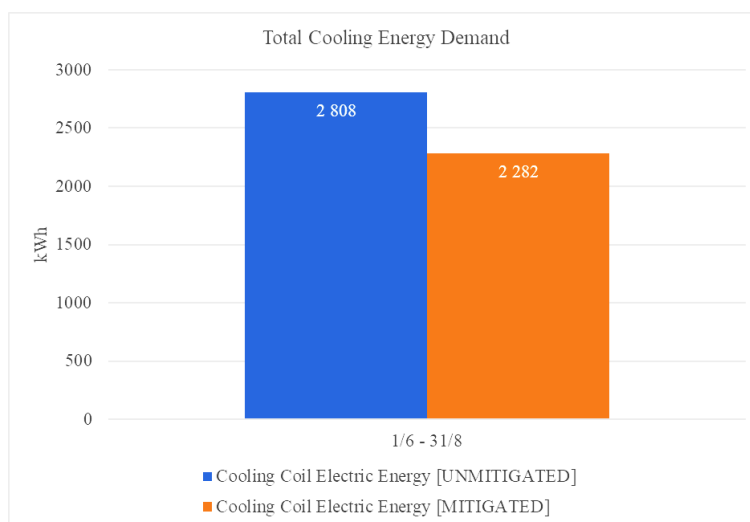


Figura 5. Consumo elettrico sistema ad espansione diretta

4. Conclusioni

In questo lavoro, l'effetto delle strategie di mitigazione ambientale implementate a livello di insediamento è stata valutata in termini di risparmio energetico del sistema ad espansione diretta, dimostrando la bontà dei risultati raggiungibili. In conclusione, gli effetti della mitigazione ambientale hanno effetti benefici sul funzionamento estivo dei sistemi ad espansione diretta. In particolare, nella presente analisi, la combinazione di tecniche di mitigazione del microclima con materiali ad elevato albedo, incremento della superficie adibita a verde urbano e sistemi evaporativi, quantitativamente rappresentate nel file climatico mitigato utilizzato nella simulazione dinamica, consente al sistema ad espansione diretta di operare in condizioni favorevoli. Ciò comporta il raggiungimento di risparmi energetici per il sistema impiantistico fino al 18,7% del fabbisogno energetico utile durante la stagione estiva.

Bibliografia

1. Santamouris, M., Kolokotsa, D., 2015. On the impact of urban overheating and extreme climatic conditions on housing energy comfort and environmental quality of vulnerable population in Europe. *Energy Build.* **98**, 125–133.
2. Akbari, H., Pomerantz, M., Taha, H., 2001. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Sol. Energy* **70**, 295
3. Santamouris, M., 2001. *Energy and Climate in the Urban Built Environment*. Earthscan Publishers, London.
4. Akbari, H., Cartalis, C., Kolokotsa, D., Muscio, A., Pisello, A.L., Rossi, F., Santamouris, M., Synnefa, A., Wong, N.H., Zinzi, M., 2016. Local climate change and urban heat island mitigation techniques – the state of the art. *J. Civ. Eng. Manage.* **22**(1), 1–16.
5. Castaldo V.L., Pisello A.L., Piselli C., Fabiani C., Cotana F., Santamouris M., 2018. How outdoor microclimate mitigation affects building thermal-energy performance: a new design-stage method

- for energy saving in residential near-zero energy settlements in Italy. *Renewable Energy*. **127**, 920-935
6. Santamouris M., Ding L., Fiorito F., Oldfield P., Osmond P., Paolini R., Prasad D., Synnefa A., 016. Passive and active cooling for the outdoor built environment – Analysis and assessment of the cooling potential of mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects. *Solar Energy* **154**, 14-33
 7. Repubblica Italiana - Ministero dello Sviluppo Economico. Decreto interministeriale 26 giugno 2015 - Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici. 2015.
 8. EN 15251:2007 - Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics, 2007.
 9. Hamilton, J.F., and J.L. Miller. 1990. A Simulation Program for Modeling an AirConditioning System. *ASHRAE Transactions* **96**(1), 213-221.
 10. EnergyPlus, Engineering Reference. 2018. Version 9.0. Department of Energy (DoE).
 11. AHRI 2008. ANSI/AHRI Standard 210/240: 2008 Standard for Performance Rating of Unitary Air Conditioning & Air-Source Heat Pump Equipment. Arlington, VA: Air-Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute.

XIX Congresso Nazionale CIRIAF

Energia e Sviluppo Sostenibile

Architettura effimera per la ricostruzione. ANASTILOSIS (Con)temporanea.

Maria Federica Ottone ¹, Enrica Petrucci ², Dajla Riera ^{3*}

¹ Maria Federica Ottone, Università di Camerino, Scuola di Architettura e Design, Viale delle Rimembranze, 63100 Ascoli Piceno (AP), mariafederica.ottone@unicam.it

² Enrica Petrucci, Università di Camerino, Scuola di Architettura e Design, Viale delle Rimembranze, 63100 Ascoli Piceno (AP), enrica.petrucci@unicam.it

³ Dajla Riera, Università di Camerino, Scuola di Architettura e Design, Viale delle Rimembranze, 63100 Ascoli Piceno (AP), dajla.riera@unicam.it

* Autore di riferimento. E-Mail: dajla.riera@unicam.it

Abstract: A seguito del terremoto avvenuto nel centro Italia nel 2016, molte delle icone artistiche/architettoniche sono rimaste fortemente danneggiate, generando una profonda frattura sociale nelle comunità locali.

Il caso studio della Madonna del Sole di Capodacqua è una riflessione sui modelli di sviluppo nel processo della ricostruzione. Propone un'architettura effimera che vuole colmare il "gap temporale" che va dal momento della distruzione all'effettivo restauro del manufatto, attraverso una nuova tecnica qui definita "anastilosis (con)temporanea"; una ricostruzione non in loco del volume e dei caratteri simbolici del monumento, con tecniche leggere e reversibili.

La ricomposizione del volume avviene mediante una struttura in legno che riproduce la forma e le proporzioni del volume originale, intervallata da lamelle verticali in I-Mesh, tessuto innovativo composto da fibre minerali intrecciate secondo una maglia multiassiale. L'installazione è un Landmark, un'architettura virtuale, al contempo materiale, che consente una fruizione in differita del santuario, dichiarando la temporaneità dell'allestimento attraverso l'idea della leggerezza e del movimento.

Si ritiene importante restituire, attraverso installazioni temporanee, un rapporto fecondo tra storia e contemporaneità, generando diverse opportunità di fruizione e promozione turistica, puntando ad un pubblico interessato a comprendere e scoprire le opere non più visitabili per effetto del terremoto.

Keywords: Ricostruzione, Simboli, Tecnologie leggere, Post-terremoto, Architettura effimera.

1. Introduzione

A seguito del disastroso terremoto che ha colpito le Marche meridionali, si è registrata una notevole perdita di edifici danneggiati o crollati. L'Istat [1] stima in 293 il numero dei monumenti distrutti o totalmente inagibili dal sisma dell'agosto 2016; cifra aumentata ulteriormente a seguito delle successive scosse di ottobre 2016 e di gennaio 2017. Fra questi i beni che rappresentano l'identità dei luoghi, fra cui torri, chiese, campanili, monasteri, palazzi storici ma anche un tessuto di edilizia minore che connotava la maggior parte dei borghi, investiti dal sisma.

Davanti a un terremoto di così impressionante forza distruttiva le parole vengono meno, e così a parlare sono le immagini delle devastazioni. Ogni evento traumatico causa una dissociazione, una lacerazione tra memoria e oblio: "dov'era e com'era" [2] è l'espressione di questa lacerazione.

Figura 1. Capodacqua pre/post terremoto



Con il fine di riproporre alcune architetture che sono andate perdute o che hanno sofferto danni gravissimi, si è recentemente aperta una nuova via, quella dell'apporto del digitale nell'ambito del patrimonio culturale.

Negli ultimi decenni il Virtual Heritage si è focalizzato su quattro principali tematiche che riguardano lo studio, la conservazione, il restauro e la fruizione dei beni culturali [3]. Le tecnologie dell'informazione applicate alla conservazione dei beni culturali hanno lo scopo di documentare con precisione lo stato dei beni, anche quelli danneggiati dal sisma, in modo da poterne monitorare condizioni e soprattutto aprirle ad una nuova fruizione. Quest'ultima può essere migliorata grazie a ricostruzioni tridimensionali, a guide elettroniche personalizzate e tecnologie immersive [4]. Interessanti sono anche le frontiere del restauro effimero [5] che evoca una completezza necessaria ai fini della comprensione del testo originario, che non si presenta solo materialmente come ricostruzione ma anche come 'finzione virtuale', mostrando qualcosa che è andato perduto e che non può essere trasmesso al futuro.

Nell'ambito delle azioni di ricostruzione devono, inoltre, essere considerati gli aspetti legati alla dimensione turistico-culturale. Appare evidente come la recente devastazione operata dal terremoto

sul patrimonio culturale e ambientale del centro Italia, abbia messo in ginocchio, oltre alle comunità, tutta la filiera del turismo culturale.

Le disposizioni urgenti emanate già all'indomani delle prime scosse e ulteriormente dettagliate nei mesi successivi hanno cercato di fornire presidi e agevolazioni, utili a salvaguardare/ripristinare il sistema sociale e produttivo del territorio. In tale variegato panorama, la ricostruzione non dovrebbe fermarsi alla sola ricomposizione fisica dei luoghi in condizioni di sicurezza, ma proporre anche una riflessione sui modelli di sviluppo da mettere in atto e sul ruolo che le comunità locali possono assumere in questo articolato processo. Ci sono tutti gli elementi per raccogliere la sfida di una rinascita basata su una governance partecipativa, in grado di individuare approcci innovativi multidisciplinari, per cogliere le criticità e proporre soluzioni integrate verso una ricostruzione che possa garantire coesione, senso di appartenenza alla società, fiducia e rispetto per l'ambiente e dei propri valori identitari.

Per tale motivo si è inteso proporre una ricostruzione, attraverso un modello in scala, di uno dei beni che essendo stato fortemente compromesso, può rappresentare un simbolo di rinascita: la chiesa di S. Maria del Sole a Capodacqua di Arquata del Tronto.

Il tetto e la parte sommitale del volume ottagonale sono in parte crollati, così come la cornice del rosone. Fortemente lesionato è anche l'interno, le cui pareti sono caratterizzate da affreschi riconducibili al XVI secolo, di cui alcuni attribuiti a un discepolo della scuola di Carlo Crivelli. L'affresco rimanda all'origine della chiesa, costruita nel luogo dove, in tempi remoti, avvenivano riti naturalistici in onore del Dio Sole, fino a quando la comunità locale abbandonò tali rituali in favore del culto per la Vergine.

Il caso studio del Santuario può offrire la possibilità di applicare ad un edificio di notevole valore storico, una nuova tecnica che qui viene definita come "anastilosi temporanea", proponendo la ricostruzione temporanea del volume e dei caratteri simbolici del piccolo monumento, attraverso l'utilizzo di materiali leggeri e completamente reversibili. Lo scopo è quello di generare una nuova opera architettonica, smontabile e trasportabile, sulla quale poter proiettare le immagini degli elementi più significativi della chiesa.

L'obiettivo è quello di creare una diversa opportunità di fruizione e promozione turistica, puntando ad un pubblico internazionale interessato a comprendere e scoprire le opere che non sono più visitabili per effetto del terremoto. Al tempo stesso si vuole promuovere con una raccolta fondi le azioni che, associazioni come il FAI, hanno intrapreso per la messa in sicurezza ed il restauro della chiesa di S. Maria del Sole e per altri importanti monumenti danneggiati dal sisma.

Figura 2. Il tempietto della Madonna del Sole a Capodacqua, frazione di Arquata del Tronto dopo il primo terremoto di agosto 2016



Figura 3 Il tempietto della Madonna del Sole a Capodacqua, frazione di Arquata del Tronto dopo il secondo terremoto di ottobre 2016



2. Una breve storia della Madonna del Sole a Capodacqua di Arquata del Tronto

L'Oratorio della Madonna del Sole, nella frazione di Capodacqua di Arquata del Tronto, è un piccolo edificio religioso a pianta ottagonale risalente alla seconda metà del XVI secolo, la cui ideazione viene per tradizione attribuita a Nicola Filotesio, noto come Cola d'Amatrice (1489 – 1559), architetto, pittore e scultore originario di quei territori. Non esistono documenti che possano supportare tale attribuzione, pertanto il tempietto può essere stilisticamente inquadrato come opera rinascimentale che segue l'impostazione delle chiese votive a pianta centrale presenti nelle aree transappenniniche dell'Italia centrale. Questa e molte costruzioni consimili costituivano solidi punti di riferimento lungo le vie del commercio e della pastorizia, divenendo spesso lo scenario di fiere e mercati. Le molteplici fonti d'acqua sorgiva della zona costituivano già un imprescindibile motivo di richiamo nella vita e nell'economia del tempo, motivando anche l'ubicazione e l'accurata configurazione della chiesa.

La pianta ad ottagono ha chiaro valore simbolico: l'ottagono, figura mediatrice fra il quadrato (la Terra) ed il cerchio (il Cielo) raffigura la salvezza che la Vergine, tramite il suo Figlio, assicura al popolo dei credenti. All'esterno la facciata è abbellita da un rosone, situato sopra l'ingresso principale, da iscrizioni e dalle stilizzazioni del Sole e della Luna. Il Sole simboleggia l'eternità di Dio, mentre la luna è espressione della provvisorietà della vita umana. Tali elementi accentuano la valenza simbolica dell'edificio, legando l'immagine del tempietto e di Maria ad una cosmologia sacra dove fede e spiritualità si compongono in armonia con i ritmi della vita.

Il tempietto presenta un alzatao assai elegante in pietra arenaria tipica delle costruzioni della zona. I conci ben squadriati e trattati alla martellina, secondo una tradizione costruttiva locale, sono connotati dalla variazione cromatica della pietra dal giallo dorato all'azzurro brunito e costituiscono lo sfondo per un'articolata composizione di forte coesione formale. L'interno presenta affreschi di varie epoche, attribuiti a diversi artisti: fra i più interessanti l'Assunzione della Beata Vergine fra gli Apostoli (1556), opera drammatica e scenograficamente complessa. Anche l'affresco raffigurante la Madonna del Sole (1523) è di particolare interesse. L'immagine principale è contenuta all'interno di un'edicola in pietra. L'affresco maggiore è stato attribuito ad un discepolo di Carlo Crivelli; tale attribuzione può essere supportata da alcuni elementi presenti all'interno dell'affresco: la decorazione damascata, l'assenza di prospettiva e il carattere delle vesti, oltre al volto della Vergine seduta in trono con il bambino sulle ginocchia che sorregge in mano il sole.

Sopra l'altare maggiore un quadro di un autore ignoto, raffigura la Madonna tra le nuvole, la cui simbologia rimanda alle frequenti liti tra Norcia e la comunità di Capodacqua per il possesso dei ricchi pascoli e dei boschi della zona montana. Al di sopra dell'immagine della Madonna con il Bambino vi è una lunetta attribuita a Cola dell'Amatrice in cui è dipinta una Pietà: la Madonna con in grembo il Cristo morto, S. Giovanni che gli regge il braccio destro e ai piedi la Maddalena. A sinistra dell'altare è collocato l'affresco raffigurante la Deposizione della Croce opera attribuita anch'essa alla bottega di Cola.

Figura 4. Elaborati Laboratorio Restauro Architettonico 2006/2007 _Prof. Enrica Petrucci, Prof. Alessandro Zona Studenti: S.Corradetti, D. Di Giosa, S. Galiffa Università degli studi di Camerino

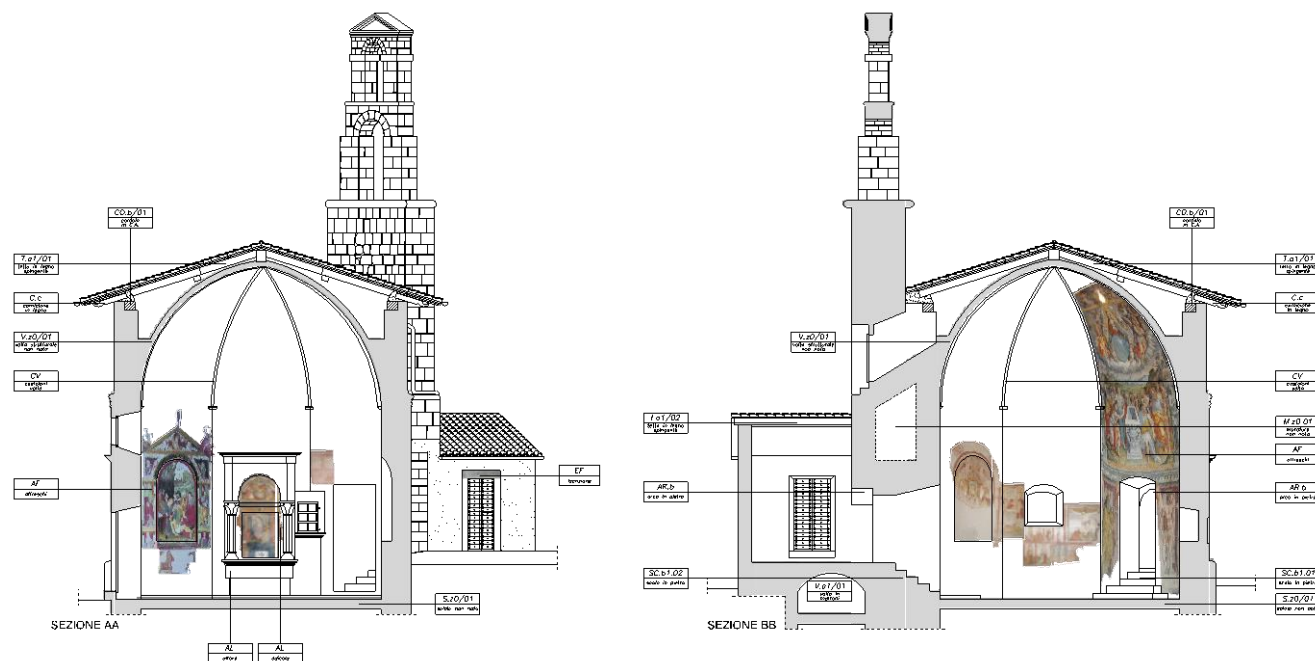


Figura 5. Facciata esterna del Santuario della Madonna del Sole.

Archivio foto 2014 – Proprietà delle foto della Diocesi di Ascoli Piceno.



3. Anastilosi e architettura effimera

L'anastilosi, dal termine ἀναστήλωσις «riedificazione», prefigura la ricostruzione di un monumento attraverso la “cernita, il riconoscimento e il rimontaggio” in sito delle sue parti, ricomposte “secondo la necessaria congruenza e la logica costruttiva” [6].

La metodologia che qui si vuole proporre, attraverso il caso studio del tempietto dedicato alla Madonna del Sole di Arquata del Tronto, consiste nella ricomposizione del manufatto architettonico utilizzando un materiale leggero e “morbido” che, per cromaticità e tecnologia di montaggio, può evocare forma e proporzioni dell'architettura storica, ma contemporaneamente dichiarare la propria autonomia e forza espressiva, senza entrare in contrasto con la preesistenza.

È un'architettura effimera che vuole colmare quel “gap temporale” che va dal momento della distruzione all'effettiva ricostruzione, dove il concetto di effimero viene declinato nel suo significato di “transitorio” e si scontra con una visione tradizionale dell'architettura storica, basata sull'idea di permanenza e strutturata attraverso concetti quali proporzioni armoniche, ordini e numeri, profili e volumi. Nella storia dell'architettura si incontrano due opposti orientamenti: da un lato è chiara la volontà di perseguire una permanenza del segno attraverso la durata nel tempo dell'architettura, per mezzo della sostanziale immutabilità del materiale. Dall'altra si manifesta una permanenza dell'idea che è conseguita mediante la continuità del pensiero ma non del materiale. Anzi, in taluni casi, solo la precaria [1] fugacità del tempo può donare una forte persistenza alla memoria. Da ciò, si spiega l'apparente ossimoro effimero/permanente che in realtà non tale, in quanto il primo termine è semmai da ritenersi riferente alla durata materiale, mentre il secondo alla sua continuità. A ben vedere, il primo termine, nell'accezione più vasta, non può ricondursi direttamente al concetto di tempo e quindi alla effimerità materiale, ma semmai è un peculiare modo di sviluppare e concepire l'architettura stessa. Per tale ragione possiamo parlare di architettura effimera non semplicemente attribuendole un valore di temporaneità. L'architettura effimera coinvolge il modo stesso in cui è concepita, e può essere espressa con un diverso linguaggio e una diversa matrice espressiva [7].

Dalle considerazioni fatte sul concetto di anastilosi ed effimero, nasce la volontà di applicare ad un edificio di notevole valore storico, una nuova tecnica che qui viene definita come “anastilosi (con)temporanea”, ovvero la ricostruzione non in loco del volume e dei caratteri simbolici del piccolo monumento, attraverso l'utilizzo di materiali leggeri e completamente reversibili [8].

4. Tecnologia e materiali innovativi per la ricostruzione

La tecnologia adottata è frutto di una ricerca in collaborazione con gli sviluppatori del tessuto innovativo I-MESH e la Scuola di Architettura e Design dell'Università di Camerino. Si basa sulla ricomposizione del volume del tempietto utilizzando una successione di lamelle verticali in I-Mesh, tessuto innovativo composto da fibre minerali intrecciate secondo una maglia multiassiale, e una struttura in legno che riproduce fedelmente la forma e le proporzioni del volume originale.

La struttura in legno è di 8,90m x 8,90m in pianta e si sviluppa per un'altezza di 10,30 m. Il telaio strutturale ha una sezione di 10x10 cm; la lunghezza delle singole componenti è di 4,5 m in copertura e di 3,60 m per quelli sottostanti. L'assemblaggio degli elementi non richiede l'uso di colla, chiodi o

utensili elettrici di alcun tipo grazie all'ingegnerizzazione e prototipazione altamente high tech, ovvero con l'ausilio di macchine con taglio a controllo numerico, e ad un assemblaggio low-tech caratterizzato da giunti ad incastro. Questa tecnica dà la possibilità di porre in opera la struttura senza l'ausilio di installatori altamente qualificati e permette il coinvolgimento tangibile delle comunità locali interessate, dando un valore psicologico e sociale all'architettura ricreata [9].

L'attacco della struttura al terreno avviene tramite semplice appoggio dei telai su fondazioni puntiformi, nascoste all'interno di una piattaforma che separa la struttura dalla pavimentazione che ospiterà l'installazione. Quest'ultima, anch'essa smontabile e modulare, ha lo scopo di rendere ancora più flessibile il posizionamento sopra qualunque pavimentazione, senza intaccare la superficie ospitante.

Figura 6. Spaccato Assonometrico e pianta _Anastilosì (con)temporanea

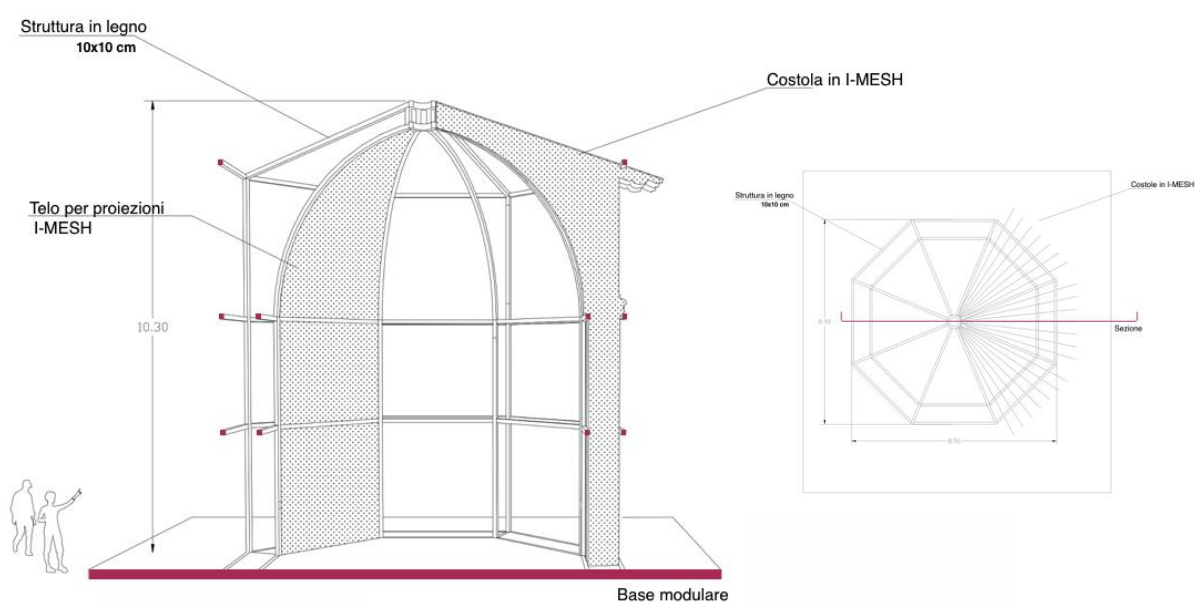
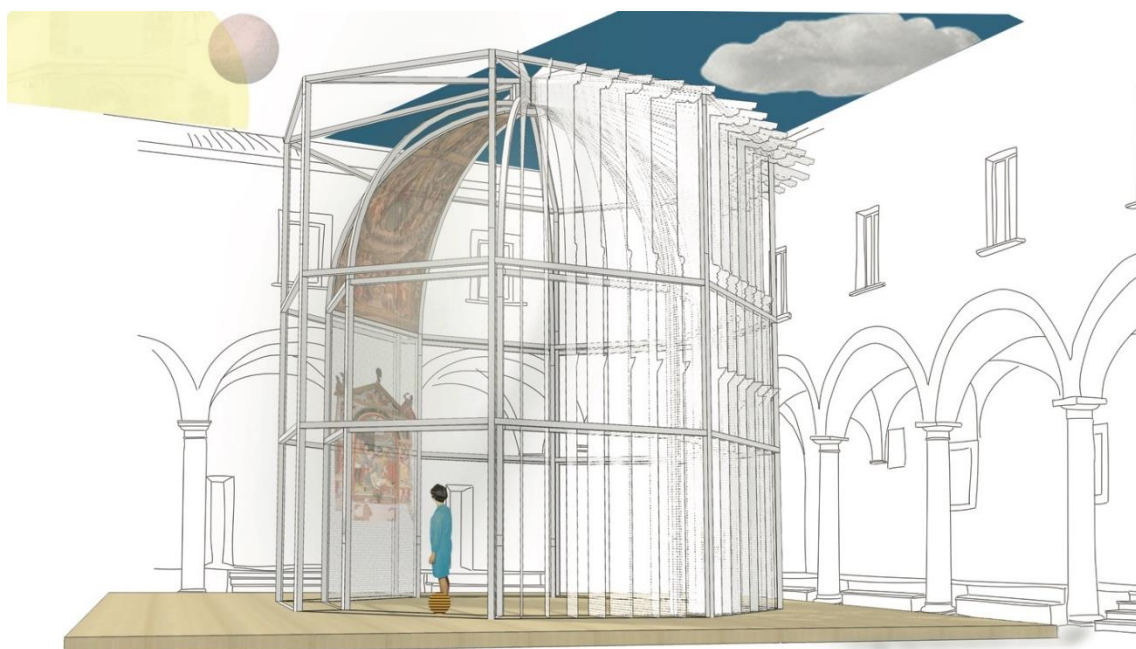


Figura 7. Vista Prospettica _Anastilosì (con)temporanea

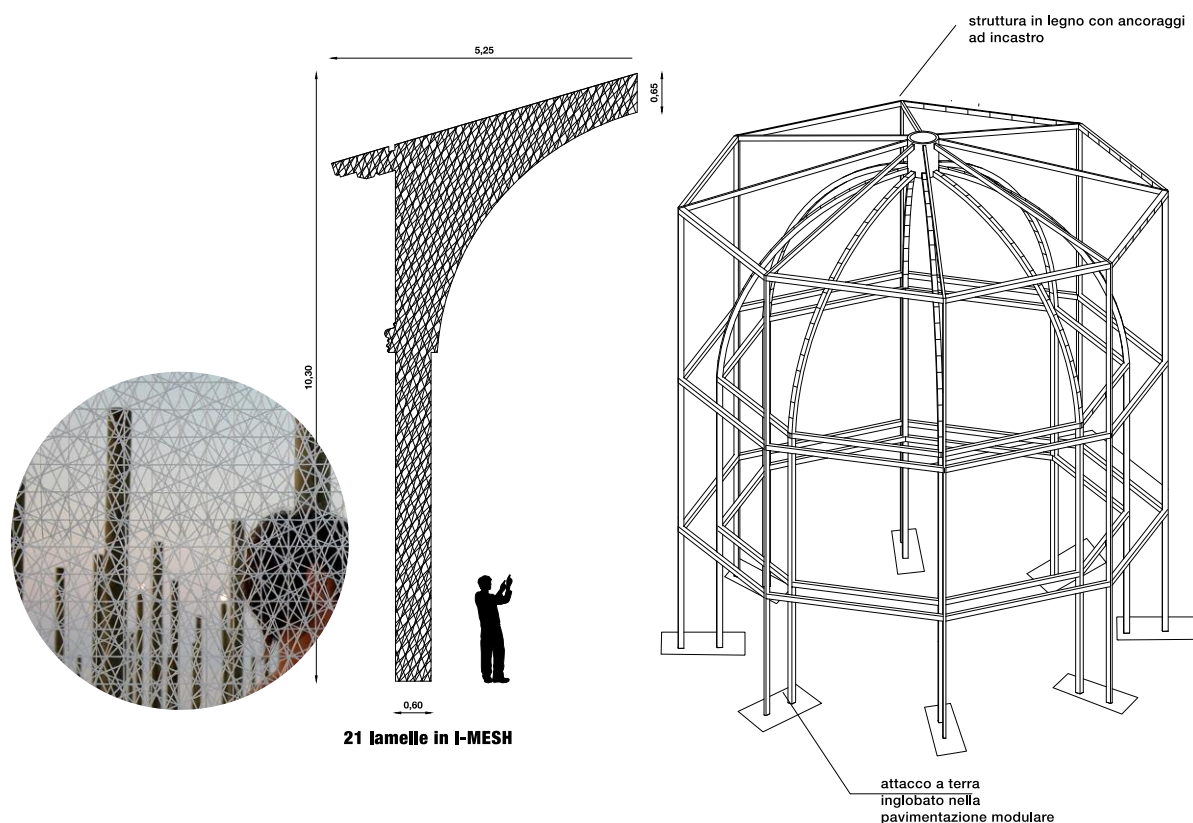


Le costole in tessuto I-MESH ricostruiscono il profilo di sezione del volume, riportando le modanature e le proporzioni della struttura originale sia in interno che in esterno. La tessitura del materiale è ingegnerizzata in modo da conferire al tessuto una rigidità adeguata e stecche poste in tasche nella sommità della costola scongiurano l'effetto "spanciamento" nelle parti oblique della copertura. Viene comunque preservato l'effetto del movimento e della morbidezza del tessuto, garantendo l'effetto di mutevolezza a seconda delle condizioni ambientali di contesto.

Il sistema a costole è applicato solo in una porzione della struttura; il resto è completamente permeabile e fruibile tranne per un'area dove il tessuto viene teso tra i montanti in legno, a ricostruire un'unghia interna, generando una quinta per le proiezioni. Una delle tante peculiarità del tessuto utilizzato è l'essere riflettente e adatto a ricevere immagini proiettate sulla sua superficie. In questo caso, verranno proiettati gli affreschi che erano conservati all'interno della chiesa, restituendo una memoria visiva e spaziale.

L'intervento – di natura prevalentemente effimera – può essere interpretato come atto di restauro non eseguito direttamente sulla materia antica ma che si indirizza alla sua 'comprensibilità'. Così come proposto dall'artista Tresoldi per la basilica di Siponto in Puglia, l'installazione vuole rappresentare un *Landmark*, un'architettura virtuale e al tempo stesso materiale, che consente una fruizione differita dell'opera, oggi resa impossibile dall'evento catastrofico. In questo caso, l'effetto che si vuole ottenere è quello di evocare il volume e il colore non uniforme del monumento, dichiarando la temporaneità dell'allestimento attraverso l'idea della leggerezza e del movimento.

Figura 8. Prospetto lamella in I-MESH e vista prospettica struttura in legno Anastilosì (con)temporanea



5. Scenari possibili e ricostruzione temporanea futura

Il progetto proposto è l'occasione per suscitare interesse non solo nei confronti delle istituzioni e dei cittadini, ma anche di un turismo culturale sempre più esigente, verso le opere più significative e rappresentative del territorio; occasione per riflettere su pratiche innovative di ricostruzione della memoria dei luoghi, attraverso i manufatti simbolicamente più rappresentativi, prima ancora della ricomposizione fisica. Si ritiene importante restituire, attraverso installazioni temporanee, un rapporto fecondo tra storia e contemporaneità, per dare continuità di vita ai luoghi del terremoto.

Questa concezione di architettura effimera ed empatica [10], che ha come scopo il distogliere l'attenzione dalle sole qualità estetiche degli edifici e di concentrarsi anche sulle prestazioni economiche, ambientali e sociali, potrebbe essere un punto di partenza per un esperimento di costruzione collaborativa e a basso impatto ambientale.

Poiché le componenti prefabbricate di questo tipo di costruzioni sono leggere, maneggevoli e con vocazione temporanea, si apre un nuovo scenario che dà la possibilità di sperimentare componenti innovative all'interno dei temi legati alla storia e al restauro e capirne la risposta sociale e ambientale che possono avere nell'ambiente urbano [11].

Un nuovo modo di interpretare il territorio costruito, che recuperi il ruolo di responsabilità sociale dell'architetto verso la comunità, non tralasciando aspirazioni e desideri. È occasione per ricreare un filo conduttore tra l'architettura e i bisogni, anche immateriali, che le persone hanno, ricreando un'occasione di rilancio del territorio [12].

Figura 9. Vista Prospettica _Anastilosì (con)temporanea



References

1. ISTAT, Caratteristiche dei territori colpiti dal sisma del 24 Agosto 2016, 2016
2. Marconi, P. Com' era, dov' era: dopo il terremoto, o la guerra, Ed. Carocci, Roma, Italia, 2009
3. Bellotti, F. Berta, R. De Gloria, A. Virtual Heritage: Le Tecnologie dell'Informazione (IT) applicate ai Beni Culturali. *Storicamente*, 1–7, 2013.
4. Giammusso, F.M. La ricostruzione virtuale digitale come strumento per l'analisi storica dell'architettura, in «Infolio. Rivista del dottorato di ricerca in analisi, rappresentazione, pianificazione delle risorse territoriale, urbane, storiche-architettoniche e artistiche, Università di Palermo», XXXI, 2014, pp.43-46.
5. Unali, M. Architettura effimera, in XXI Secolo, Gli spazi e le arti, opera diretta da Tullio Gregory, Istituto della Enciclopedia Italiana, Roma 2010, pp. 345-353.
6. Rocchi, G. Istituzioni di restauro dei beni architettonici e ambientali, Hoepli. Torino, 1985.
7. Petrucci, E. L'interpretazione dell'architettura antica e l'effimero: quali percorsi di sviluppo nella disciplina della conservazione, in Fiorani D. (a cura di), RICerca/REStauo, Valorizzazione e gestione delle informazioni, sez. 4, pp. 886-895, Roma, Edizioni Quasar. 2017.
8. Perego, F. Anastilosi. L'antico, il restauro, la città. Laterza, Bari, 1986
9. Kobayashi H, O'Keefe D. Empathic architecture: Digital fabrication and community participation. *Lecture Notes in Civil Engineering*. Springer. 2019. p. 1063-1086.
10. Cucinella, M. Arcipelago Italia: progetti per il futuro dei territori interni del paese: padiglione Italia alle Biennale Architettura 2018, Quadlibet, Macerata. 2018
11. Ottone, F. Cocci, G. R. Tecnologie urbane: Costruito e non costruito per la configurazione degli spazi aperti, LISt Lab, Trento, 2017
12. Turbull, J. Toyo Ito: forces of nature. Princeton Architectural, New York, NY, 2012.

XIX Congresso Nazionale CIRIAF

Energia e Sviluppo Sostenibile

Prodotti a basse emissioni di carbonio: potenzialità e limiti della manifattura della regione Lazio.

Federico Orsini ^{1,*}, Paola Marrone¹

¹ Università degli Studi di Roma TRE, Dipartimento di Architettura, Via della Madonna dei Monti 40, Rome (IT)

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: federico.orsini@uniroma3.it

Abstract: Il settore manifatturiero è uno dei principali responsabili per le emissioni nell'atmosfera di Gas Serra e per questa ragione gioca un ruolo fondamentale nella lotta al cambiamento climatico. Appare evidente come proprio il settore produttivo possa attraverso l'adozione di specifiche azioni ridurre l'emissione dei gas serra e contribuire al raggiungimento degli obiettivi previsti dall'Accordo di Parigi e da quanto indicato dall'ultimo report dell'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC 2018). Nonostante gli incentivi e le attuali normative, la transizione verso la *circular economy* appare ancora lenta e difficile.

Il presente lavoro si inserisce all'intero di questo quadro e, in particolare, quello dell'industria dei prodotti per l'edilizia della regione Lazio. Dallo studio, condotto analizzando i processi produttivi di alcune aziende situate nella regione Lazio rispetto a processi basati sui principi della *circular economy*, emerge come, nonostante alcune interessanti esperienze, i modelli maggiormente diffusi siano ancora fortemente legati a modelli produttivi tradizionali e ad alte emissioni di carbonio.

Keywords: *Low carbon*, Manifattura, Prodotti per l'edilizia, Economica circolare, Regione Lazio.

1. Introduzione

Il settore manifatturiero è uno dei principali responsabili per le emissioni nell'atmosfera di Gas Serra (GS) e l'industria del cemento e dell'acciaio, in particolare, da sole, contribuiscono per il 10-12% delle emissioni globali in Europa [1]. Ridurre le emissioni di GS significa ridurre gli effetti devastanti dei cambiamenti climatici secondo le priorità stabilite dai più recenti accordi [2] e report internazionali [3].

All'intero di questo quadro, l'industria delle costruzioni può giocare un ruolo fondamentale attraverso un radicale ripensamento dei processi produttivi avviando la transizione verso l'Economia Circolare (CE) [4] [5] [6] [7].

Al fine di favorire questa transizione, specifiche normative tecniche sono state adottate prima a livello internazionale [8], poi a livello nazionale [9], con l'obiettivo di favorire l'adozione di prodotti a basse emissioni di carbonio, incentivando il passaggio da un'economia tradizionale ad un'economia "green" e circolare. Nonostante interessanti esempi innovativi [10], l'industria manifatturiera, tuttavia, appare essere ancora troppo legata a modelli produttivi tradizionali, energivori e ad alte emissioni di GS.

Il presente lavoro analizza debolezze e potenzialità del settore manifatturiero relativamente a materiali e prodotti per l'edilizia, focalizzando la propria attenzione sul panorama della regione Lazio.

La prima sezione di questo lavoro introduce il problema e codifica l'ambito di ricerca; la seconda sezione presenta la metodologia adottata per svilupparlo; la terza sezione ne descrive i risultati, li discute nella quarta e, infine, nella quinta presenta le osservazioni conclusive.

2. Obiettivi e Metodologia

Il lavoro analizza le capacità dell'industria manifatturiera della regione Lazio di realizzare materiali a basse emissioni di carbonio. Tale analisi, condotta limitatamente ai prodotti per l'edilizia, mira a definire uno stato dell'arte del panorama industriale regionale, individuandone debolezze e potenzialità.

Per raggiungere questo obiettivo il lavoro è stato articolato in diverse azioni di ricerca, tra di loro interconnesse.

La prima azione, condotta attraverso una approfondita *literature review*, ha permesso di individuare strategie innovative per la produzione di materiali per l'edilizia a basse emissioni di carbonio, codificando 7 strategie, definite in questa sede come Approcci a Basse Emissioni di Carbonio (ABEC).

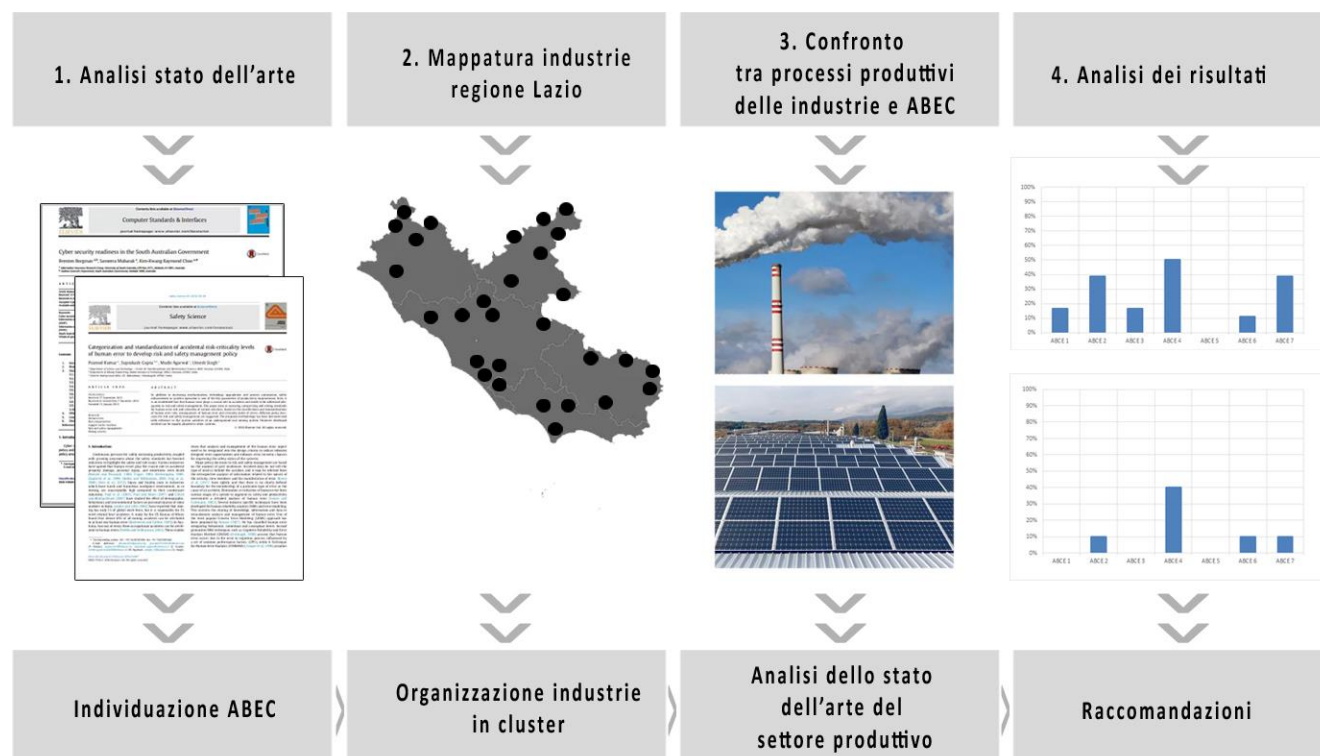
Sulla base di questo quadro, oggetto di una pubblicazione indipendente, è stata impostata la seconda azione con l'obiettivo di analizzare i limiti e potenzialità del settore manifatturiero della regione Lazio. In particolare, questa seconda azione è stata sviluppata, prima attraverso un'analisi di mercato che ha portato all'individuazione di un ampio campione di industrie manifatturiere laziali, clusterizzate per tipologia di prodotto, poi comparando i processi produttivi delle aziende individuate rispetto agli approcci innovativi ritrovati in letteratura.

La terza azione della ricerca ha messo a sistema i risultati. Il confronto tra i processi produttivi reali delle singole aziende e gli Approcci a Basse Emissioni di Carbonio, individuati nella letteratura scientifica (ABEC), ha permesso di definire possibili raccomandazioni per le aziende laziali, ossia azioni da implementare nei tradizionali processi produttivi, al fine di avvicinarsi ai principi dell'economia circolare e favorire l'incremento della sostenibilità ambientale.

La ricerca è stata rivolta, in particolare, a quei settori produttivi che sono rappresentati da un più ampio campione di aziende produttrici, quali ad esempio i settori dei manufatti in cemento ed i manufatti in cotto. L'indagine sui processi produttivi è stata sviluppata analizzando prima l'intero campione delle aziende individuate nella regione Lazio per avere un quadro complessivo, poi i singoli cluster produttivi, analizzando quindi il comportamento di aziende che producono la stessa tipologia di prodotto. I principali cluster individuati sono quelli dei manufatti in cemento, dei manufatti in

laterizio, degli isolanti e dei manufatti in gres/ceramica. Aziende che producono prodotti che non rientrano all'interno di questi cluster sono state raggruppate in una categoria generica.

Figura 1. l'immagine descrive la metodologia adottata.



3. Risultati

3.1. Strategie innovative per la produzione di materiali per l'edilizia a basse emissioni di carbonio

L'attività di revisione della letteratura ha identificato diverse strategie per l'implementazione di materiali a basso contenuto di carbonio, originariamente classificati all'interno di questa ricerca con 7 approcci, denominati Approcci a Basse Emissioni di Carbonio (ABEC):

- **ABEC 1 – Utilizzo di materiali alternativi.**

Tale approccio mira a minimizzare l'utilizzo di materiali ad alto consumo di energia, sostituendoli con materiali più sostenibili e introducendo nel mix altri materiali naturali riducendo l'utilizzo di materie prime.

- **ABEC 2 – Utilizzo di materiali di riuso – riciclo – scarti.**

Tale approccio introduce nel processo produttivo scarti dei processi industriali e di cava o materiali legati ai processi di demolizione, che possono essere riciclati.

- **ABEC 3 – Utilizzo di materiali naturali.**

Tale approccio si basa sull'utilizzo di materiali naturali, quali il legno, la terra, la canapa. L'utilizzo di tali materiali riduce fortemente le emissioni di GHG per via della loro bassa impronta ambientale e per l'assenza di processi di cottura.

- **ABEC 4 – Utilizzo di materiali locali.**

Tale approccio può essere applicato decentralizzando la produzione direttamente sul luogo del cantiere, utilizzando risorse e capacità locali; minimizzando i trasporti e massimizzare l'utilizzo di materiali e risorse locali.

- **ABEC 5 – Innovazione del processo produttivo.**

Tale approccio si basa sulla riduzione del consumo di energia nei processi produttivi, recuperando il calore prodotto per reimmetterlo nel ciclo produttivo e sulla riduzione delle emissioni tramite appositi dispositivi CCU e CCS.

- **ABEC 6 – Utilizzo fonti rinnovabili.**

Tale approccio mira ad introdurre nel processo produttivo fonti di energia rinnovabili, riducendo le emissioni da combustioni di prodotti fossili.

- **ABEC 7 – Incremento delle performance.**

Tale approccio si basa sull'incremento delle performance dei materiali e sulla ottimizzazione della progettazione. Materiali più performanti e progettazione ottimale permettono di usare una minor quantità di risorse, riducendo quindi le emissioni.

Figura 2. l'immagine mostra i 7 ABEC individuati dalla *literaure review*:

1- Utilizzo di materiali alternativi; 2 - Utilizzo di materiali di riuso - riciclo - scarti;

3 - Utilizzo di materiali naturali; 4 - Utilizzo di materiali locali;

5 - Innovazione del processo produttivo; 6 - Utilizzo fonti rinnovabili

7 - Incremento delle performance.



3.2 Aziende del settore manifatturiero della regione Lazio: mappatura e interviste

A livello globale, il settore dell'edilizia rappresenta un importante motore di ricchezza, producendo, oggi, circa oltre il 12,5% del PIL e occupando oltre il 7,5% di lavoratori, e producendo in futuro oltre il 15% del PIL e occupando circa l'8,5% del totale della forza lavoro [11]. Anche in Italia, il settore edile rappresenta un importante fattore economico, diventando spesso elemento di traino per la ripresa economica [12]. Per quanto concerne la regione Lazio, nonostante la forte crisi iniziata nel 2008, il settore edile produce ancora oltre il 5% del PIL totale della regione, con più di 72.000 imprese attive [13], divise tra imprese di costruzione e imprese manifatturiere, con oltre 126 mila addetti, pari al 15% dell'universo imprenditoriale e circa il 5% dell'occupazione totale nella regione [14].

All'interno di questo settore, e limitatamente alla regione Lazio, la ricerca ha individuato un ampio campione di industrie manifatturiere legate alla produzione di prodotti per l'edilizia, attraverso un'analisi di mercato, condotta consultando:

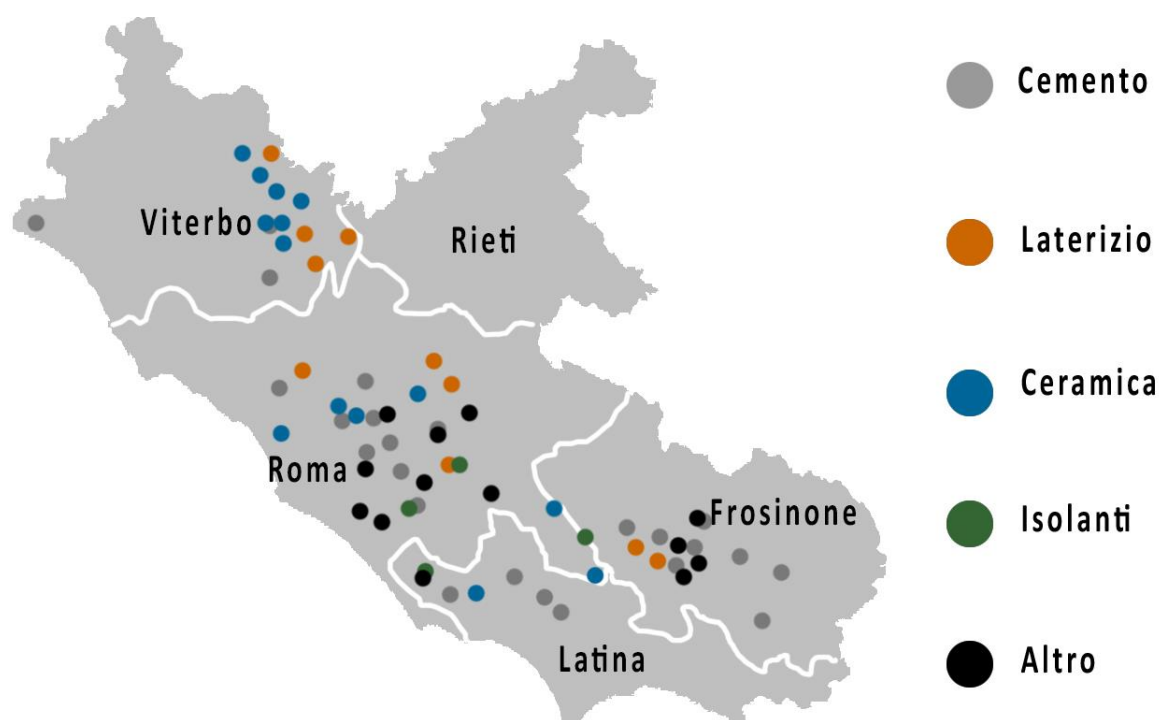
- motori di ricerca sul web;
- siti specifici quali Pagine Gialle e Pagine Bianche;
- pagine web specifiche e database di imprese ¹;
- report della Regione Lazio;
- associazioni di categoria;
- esiti di bandi della Regione Lazio per l'innovazione delle imprese.

Sulla base dei dati acquisti è stato possibile definire un primo insieme di aziende campione. Per ogni azienda è stato poi consultato il sito web per analizzare i manufatti per l'edilizia prodotti. Sulla base di questa analisi è stato possibile classificare e raggruppare tutte le aziende in categorie omogenee, in base alla tipologia di prodotto prevalente.

Tabella 1. La tabella indica le aziende individuate e mappate nel territorio della regione Lazio e quelle che hanno deciso di partecipare alla ricerca e quindi sottoposte al questionario

Aziende oggetto della ricerca	Aziende individuate	Aziende intervistate
Totale aziende	67	30
Prodotti a base di cemento	25	18
Laterizio e cotto in generale	9	7
Manufatti in ceramica	11	4
Isolanti	5	0
Altri prodotti	17	1

¹ Sono stati consultati siti come www.reportaziende.it/lazio, www.mailtodo.it/regioni-italia/database-azende-lazio/, www.it.kompass.com/r/lazio/it_22.

Figura 3. L'immagine indica la distribuzione geografica delle aziende individuate.

L'analisi del comportamento di ogni azienda rispetto agli Approcci a Basse Emissioni di Carbonio è stato sviluppato attraverso un'intervista, condotta telefonicamente o, in alcuni casi, tramite sopralluogo e colloquio diretto con il responsabile dell'azienda. L'intervista è stata costruita in maniera tale da indagare il processo produttivo dell'azienda, valutando l'applicazione di uno o più ABEC. La tabella 2 mostra la struttura dell'intervista, che riporta molteplici domande organizzate secondo i ABEC individuati. La tabella 3 riporta lo schema utilizzato per sistematizzare le risposte nel data base.

Tabella 2. La tabella riporta la struttura dell'intervista, gli obiettivi e le domande che sono state effettuate alle aziende. La struttura aperta delle domande ha permesso di raccogliere ulteriori informazioni riguardo ai processi produttivi.

Ambiti delle domande	Obiettivo della domanda ed eventuale formulazione
1. Presentazione e descrizione degli obiettivi della ricerca.	Esplicitare all'interlocutore l'obiettivo del lavoro al fine di individuare all'interno dell'azienda la persona di riferimento competente.
2. Descrizione della ricerca alla persona referente dell'azienda del processo produttivo.	Esplicitare all'interlocutore l'obiettivo della ricerca al fine di comprendere l'interesse e lo stato generale dell'azienda rispetto alle tematiche legate all'economia circolare.

3. Domande specifiche relative al processo produttivo.		Individuare i processi produttivi adottati dall'azienda e verificare l'applicazione di uno o più ABEC. Le domande sono state così impostate:
	1	Può descriverci il processo produttivo adottato dalla vostra azienda?
	2	Se sono previsti, che tipologia di leganti utilizzate?
	3	Come leganti, utilizzate solo il cemento portland o anche leganti "alternativi", quali magnesio, <i>fly ash</i> , ecc. ?
	4	Che tipologia di materia prima viene utilizzata nei vostri prodotti?
	5	Utilizzate solamente materie prime o anche materie prime seconde, quali ad esempio inerti provenienti da demolizione, scarti di produzione, materiali riciclati, ecc.?
	6	Utilizzate materiali naturali di origine vegetale per la realizzazione dei vostri prodotti, quali ad esempio canapa, polvere di riso, legno, ecc.?
	7	Per quanto riguarda le materie prime, ci può descrivere la distanza rispetto allo stabilimento produttivo delle materie che utilizzate nel vostro processo produttivo?
	8	Avete processi di cottura? Se sì, utilizzate filtri specifici per le emissioni di CO ₂ , quali i sistemi CCS e CCU?
	9	Quale tipologia di fonte energetica viene utilizzata per i processi produttivi?
	10	Implementate sistemi di produzione di energia rinnovabile o usate solo energia di rete? Nel caso utilizzate energia di rete, il vostro gestore produce tramite sistemi rinnovabili?
	11	Sviluppate ricerca per incrementare le performance dei vostri manufatti al fine di ridurre le quantità di materia prima utilizzata?
	12	Adottate altre strategie per la riduzione dei consumi e delle emissioni di CO ₂ ?

Tabella 3. La tabella riporta a titolo esemplificativo la struttura del data base costruito con le risposte ottenute dalle interviste. Il codice 0-1 indica la risposta positiva. La lettera D, indica una risposta descrittiva.

Azienda	Domande												NOTE
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
....	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
Nome Azienda	D	D	0/1	D	0/1	0/1	D	0/1	D	0/1	0/1	D	Note rispetto alle singole risposte
....	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..

3.3 I cluster produttivi e l'applicazione degli ABEC

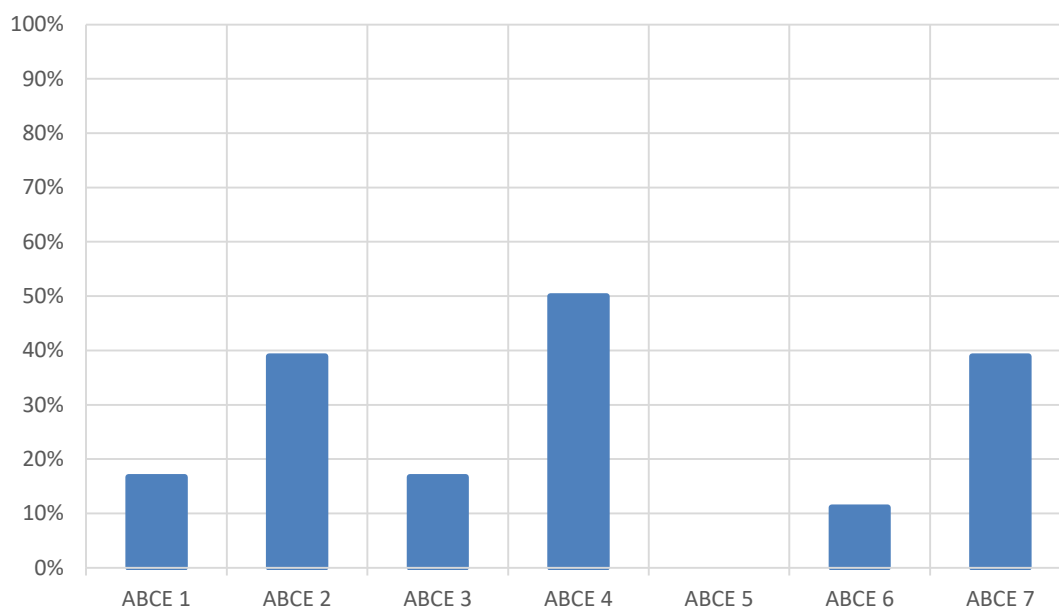
L'analisi di mercato ha individuato 67 aziende produttrici di prodotti per l'edilizia. Le aziende sono state raggruppate in cluster produttivi omogeni più o meno numerosi. Come riportato dalla tabella 1, le imprese individuate sono principalmente legate alla produzione di manufatti in cemento, in laterizio ed in ceramica. Le aziende appaio abbastanza distribuite nel territorio, eccezione fatta per la provincia di Rieti. Del totale del campione delle aziende individuate, circa il 50% ha risposto al questionario, descrivendo il processo produttivo rispetto agli ABEC.

3.3.1 Cluster dei manufatti a base di cemento

Per quanto riguarda il settore dei manufatti a base di cemento i risultati dello studio evidenziano come la maggior parte delle aziende sia ancora legata ad un sistema produttivo tradizionale (Figura 4). In generale tale processo è caratterizzato dall'utilizzo prevalente di cemento Portland (83%) e di materie prime provenienti da cava (oltre il 60%). Per quanto concerne l'utilizzo di materie prime seconde, alcune aziende hanno provato ad utilizzarle, scartando poi tale approccio per la bassa qualità del prodotto finale. Tra queste, un'azienda ha ancora in corso la fase di ricerca e sviluppo. Più diffuso (40%) è, invece, l'utilizzo di materia prima seconda proveniente dagli scarti dei propri processi produttivi. Sebbene tale pratica sia virtuosa, in termini effettivi è di ridotto impatto, considerato la bassa percentuale di scarti interni.

Per quanto riguarda la distanza tra materia prima e stabilimento produttivo, tutte le aziende utilizzano materia prima tendenzialmente locale, con distanze massime inferiori ai 100 Km e tendenzialmente comprese tra i 30 e i 60 Km. Per quanto concerne gli aspetti legati al processo produttivo, i manufatti a base di cemento non prevedono cottura, tranne alcuni rari casi nei quali alcune aziende prevedono una fase di maturazione accelerata tramite stagionatura a basse temperature (36°C). L'assenza di processi di cottura riduce le emissioni di GHG ed elimina la necessità di adottare appositi filtri. Anche se il dispendio di energia legato al processo di produzione dei manufatti in CA è inferiore ad altri processi dove è prevista la cottura (laterizio o ceramiche ad esempio), la maggior parte delle aziende non ha investito in energie rinnovabili e utilizza conseguentemente solo energia proveniente dalla rete nazionale (89%).

All'intero di questo quadro tendenzialmente poco attento alla riduzione delle emissioni di GHG, si possono trovare comunque alcune realtà imprenditoriali che stanno avviando processi di innovazione e trasformazione, in collaborazione con centri di ricerca o giovani start up. In particolare, è emerso come i principali ambiti di interesse riguardino l'utilizzo di materie prime seconde e di materiali naturali, quali la canapa, o legati con ridotte emissioni, quali la calce.

Figura 4. Analisi delle imprese laziali del settore del cemento e applicazione ABCE

3.3.2 Settore del laterizio

Per quanto riguarda il settore del laterizio è necessario evidenziare un dato iniziale, che influenza in parte la lettura complessiva dei risultati dell'indagine. Tra le aziende produttrici individuate nella regione Lazio, circa il 50% produce cotto tradizionale. La lavorazione di questo prodotto viene eseguita secondo processi tradizionali caratterizzati dalla lavorazione a mano e dall'utilizzo del legno come fonte di energia per la produzione del calore necessario alla cottura del prodotto. La volontà di mantenere vivo questo processo e collocare un prodotto sul mercato "fedele alla tradizione" trova la sua giustificazione economica nella applicabilità di tale prodotto, oltre che per nuove edificazioni, anche per interventi sull'edilizia storica, di cui è ricca il territorio laziale. La scelta di produrre un mattone tradizionale impone a queste aziende di rinunciare ad alcune delle possibilità di sviluppo offerte dall'innovazione tecnologica.

Va anche precisato però che, al fine di rendere il prodotto più sostenibile e di ridurre le emissioni di GHG, alcune imprese adottano particolari approcci alternativi. Tra questi risultano di particolare interesse:

- lo sfruttamento dell'acqua meteorica per favorire i primi processi di stagionatura e maturazione dell'argilla;
- il recupero di sfridi e materiale incoerente, prodotti durante il processo di lavorazione, al fine di realizzare altri prodotti, quali ad esempio il cocchiopesto;
- il recupero delle acque piovane in grandi bacini ricavati da cave esauste e il loro riutilizzo durante i processi produttivi;
- l'utilizzo di legna proveniente da vicini boschi appositamente gestiti;
- lo sfruttamento della ventilazione naturale appositamente progettata per favorire l'essiccamento del laterizio;

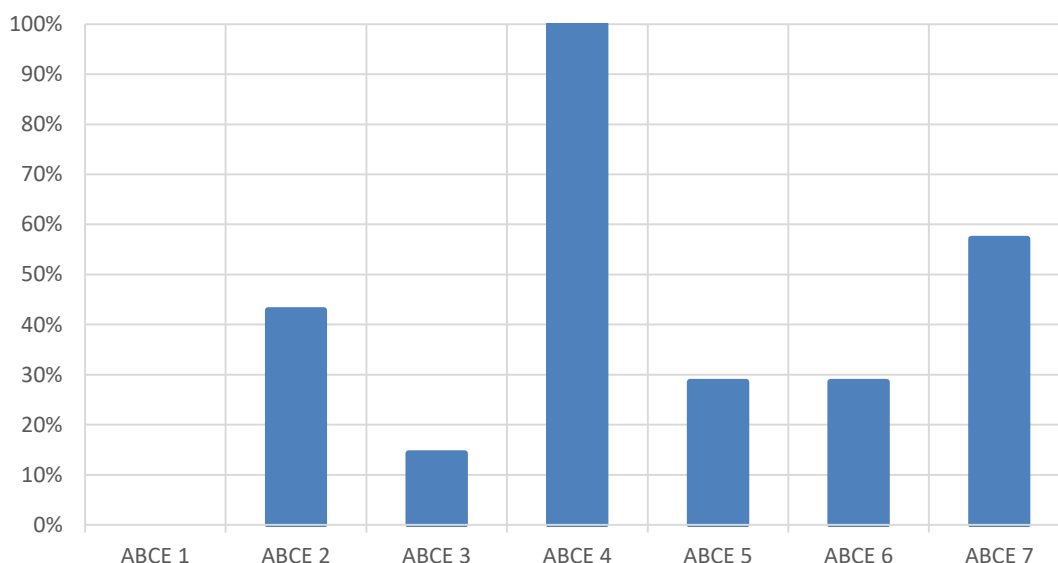
- infine, l'impatto in termini ambientali di tali aziende, anche se numerose, è però limitato dal fatto che la quantità di prodotto tradizionale immesso annualmente nel mercato è mediamente inferiore a quello delle fornaci industriali.

Alla luce di queste considerazioni introduttive, è possibile evidenziare comunque come, anche per il settore del laterizio, la maggior parte delle aziende sia ancora legata ad un sistema produttivo tradizionale (Figura 5).

In generale tale processo è caratterizzato dall'utilizzo di argilla naturale proveniente da cave limitrofe agli stabilimenti (100%). Oltre all'argilla alcune aziende utilizzano anche sabbia pozzolana e segatura di tufo (in quantità del 10% massimo). Raramente, le aziende intervistate utilizzano materia prima seconda proveniente da riciclo esterno mentre è più diffuso l'utilizzo dagli scarti di produzione interna (40%). Come per il settore del cemento, anche in questo caso, sebbene la pratica sia virtuosa incide poco in termini di volumi di materia riciclata. In alcuni casi, inoltre, è emerso come la scelta di non utilizzare prodotti alternativi, quali ad esempio le *fly ash* provenienti da combustione di rifiuti urbani, sia legata proprio al particolare processo di lavorazione a mano e permetta di evitare il contatto tra operatore e polveri sottili.

Per quanto concerne gli aspetti legati al processo produttivo, i laterizi prevedono una fase di cottura ad alte temperature, realizzata nelle grandi fornaci con gas metano, mentre nelle aziende a processo tradizionale con legna. L'analisi evidenzia come l'adozione di filtri speciali non sia particolarmente diffusa (30%), sono poco diffuso è l'utilizzo di fonti rinnovabili (30%).

Figura 5. Analisi delle imprese laziali del settore del laterizio e applicazione ABEC



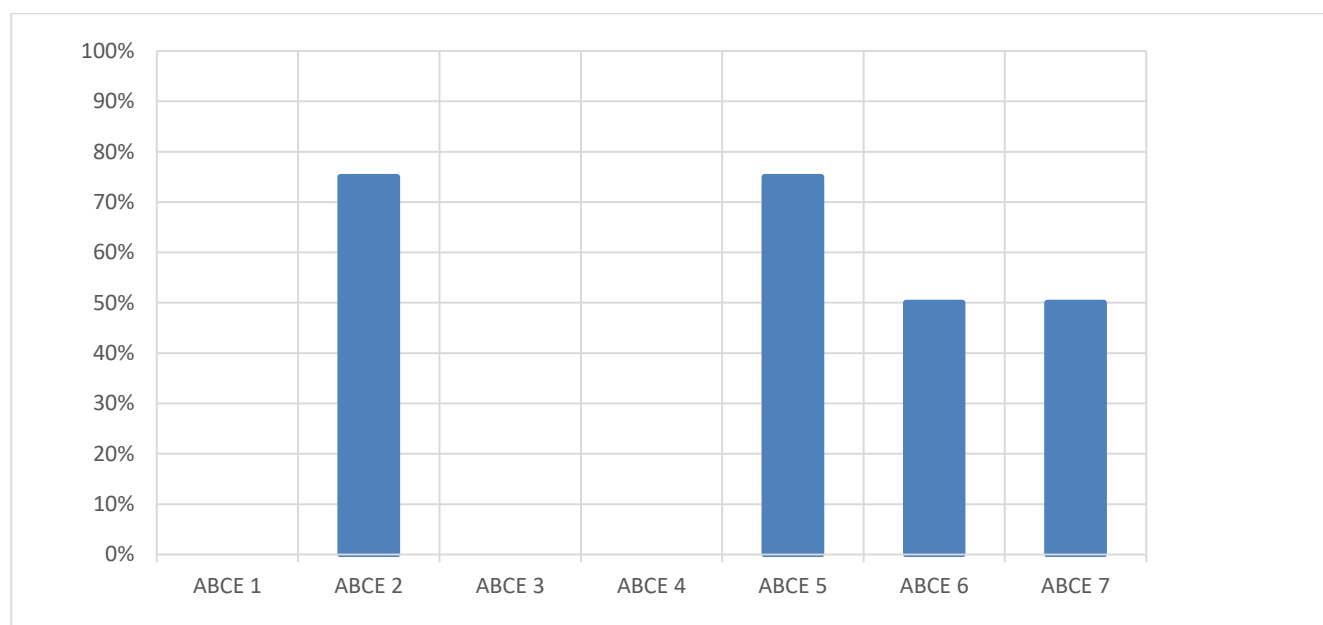
3.3.3 Settore della ceramica

Per quanto riguarda il settore della ceramica, i risultati dello studio evidenziano una tendenza positiva che vede diverse aziende implementare strategie ABEC all'interno del processo produttivo (Figura 6). Tale dato trova conferma nella recente call della regione Lazio sull'economia circolare, alla quale hanno partecipato, con progetti che andavano dall'utilizzo di materie prime seconde all'implementazione di fonti rinnovabili, numerose aziende produttrici di ceramica.

In particolare, lo studio evidenzia come diverse aziende utilizzino nell'impasto materia prima proveniente da cave e materia prima seconda (70%). Per quanto concerne gli aspetti legati al processo produttivo, la ceramica prevede una fase di cottura ad alte temperature. L'analisi evidenzia come l'adozione di filtri sia diffusa (70%) mentre meno diffuso sia l'utilizzo di fonti rinnovabili (50%).

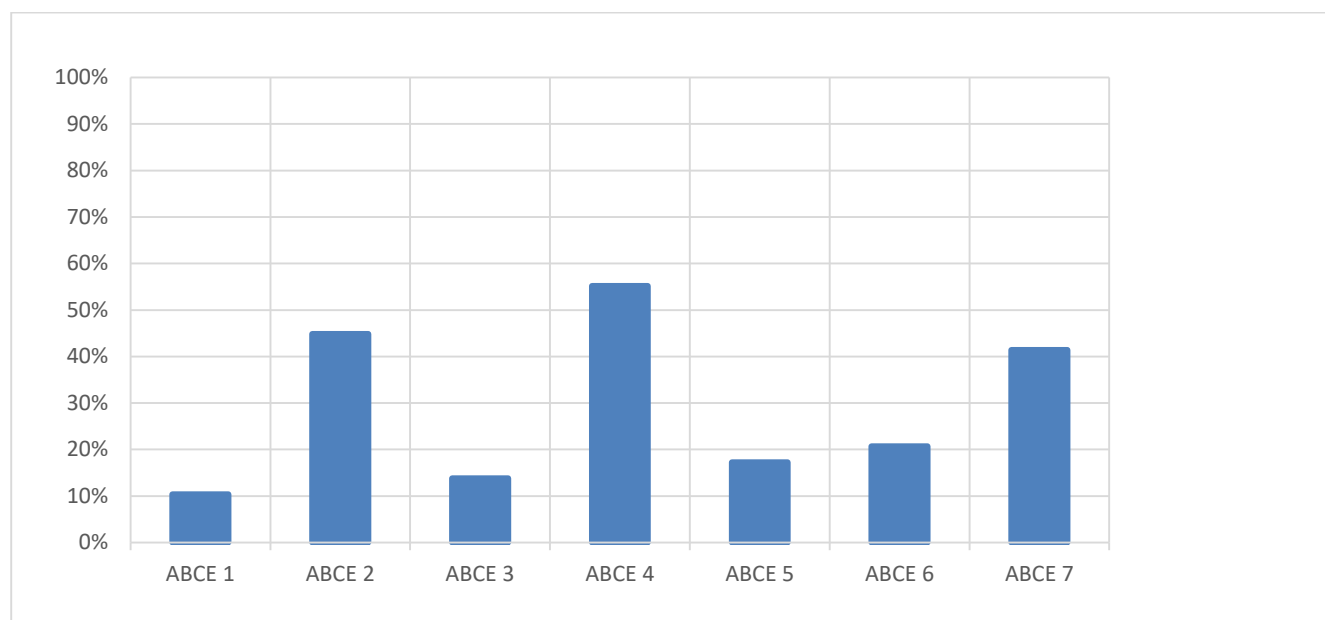
All'intero di questo quadro, si possono sottolineare comunque quelle realtà imprenditoriali che stanno avviando processi di innovazione e trasformazione anche tramite finanziamenti pubblici, in collaborazione con centri di ricerca o giovani start up. In particolare, è emerso come i principali ambiti di interesse siano l'utilizzo di materie prime seconde o l'utilizzo di fonti rinnovabili.

Figura 6. Analisi delle imprese laziali del settore della ceramica e applicazione ABEC



4. Limiti e potenzialità del settore manifatturiero della regione Lazio

La ricerca ha confrontato i processi produttivi di alcune aziende manifatturiere della regione Lazio con processi virtuosi codificati nella letteratura scientifica di settore. L'analisi ha evidenziato come in generale il settore produttivo sia ancora fortemente legato ad un sistema produttivo tradizionale e poco propenso ad implementare i nuovi Approcci a Basse Emissioni di Carbonio, definiti come ABEC (Figura 9).

Figura 7. Quadro sintetico di tutte le imprese laziali analizzate e applicazione ABCE

In particolare, il presente lavoro ha permesso di mettere in luce alcune potenzialità e alcuni punti di debolezza del settore manifatturiero e, in particolare, dell'industria dei prodotti per l'edilizia, della regione Lazio.

Per quanto concerne i punti di forza, si può osservare:

- l'interesse di molte aziende verso il tema della sostenibilità ed in particolare ai processi di innovazione per il controllo delle emissioni di gas serra;
- l'utilizzo diffuso di materie prime locali (oltre il 50%), in particolare per quanto concerne l'argilla prelevata a Km 0 per la produzione dei mattoni, per quanto concerne altri materiali da cava, sempre inferiore ai 100 Km e generalmente compreso tra i 30 ed i 70 Km;
- l'utilizzo degli scarti di produzione come materia prima seconda (oltre il 40%).

Per quanto concerne i punti di debolezza, si osserva:

- l'assenza di aggiornamento delle figure professionali interne;
- per quanto concerne la produzione di manufatti a base di cemento, prevale nettamente l'utilizzo di leganti tradizionali, quali cemento Portland (oltre l'80%);
- nonostante l'interesse di alcuni produttori, ancora oggi appare raro l'utilizzo di materie prime naturali, quali canapa e terra, per la realizzazione di prodotti innovativi ad emissioni ridotte (meno del 20%);
- la difficoltà nell'utilizzare materie prime seconde, per poca fiducia nel risultato finale e per la paura di perdita di qualità;
- sebbene in via di maggior diffusione, ancora oggi molte aziende fanno raramente ricorso all'utilizzo di fonti rinnovabili;

- la difficoltà di molte aziende di implementare in maniera sistematica i processi di ricerca e sviluppo per mancanza di fondi sufficienti anche alla luce delle difficoltà dell'intero comparto edilizio italiano.

5. Conclusione

Il presente lavoro ha indagato il ruolo che il settore manifatturiero, ed in particolare l'industria dei prodotti per l'edilizia della regione Lazio, può giocare nella lotta al cambiamento climatico, contribuendo a ridurre l'emissione dei gas serra e, quindi, al raggiungimento degli obiettivi previsti dall'Accordo di Parigi e da quanto indicato dall'ultimo report IPCC [3].

Lo studio è stato condotto confrontando strategie produttive a Basse Emissioni di Carbonio (ABEC) con i processi produttivi delle aziende individuate. Per poter effettuare questo confronto la ricerca ha:

- sviluppato un'analisi di mercato che ha portato all'individuazione di un ampio campione di industrie manifatturiere laziali;
- organizzato delle aziende in cluster omogenei a seconda dalla tipologia di prodotto;
- comparato i processi produttivi delle aziende individuate rispetto alle strategie innovative ritrovate in letteratura.

Lo studio è stato condotto attraverso interviste telefoniche effettuate con gli uffici tecnici interni delle stesse aziende o tramite sopralluoghi negli stabilimenti produttivi.

La ricerca è stata, inoltre, limitata in base ai seguenti principi:

- individuazione di aziende relative ai principali settori produttivi del settore edile, ovvero produttrici di manufatti in cemento, di laterizio, di ceramiche e di isolanti;
- esclusione di settori produttivi dove il campione delle aziende trovate fosse basso e quindi poco significativo per definire un trend generale del settore. Queste aziende sono state inserite in una generica categoria "altro", utile ugualmente per avere dati generali.

Dallo studio emerge come, nonostante alcune interessanti esperienze, i modelli maggiormente diffusi siano ancora fortemente legati a modelli produttivi tradizionali e ad alte emissioni di carbonio. In particolare, dal confronto tra i processi produttivi reali delle singole aziende e con i processi a basse emissioni di carbonio individuati nella letteratura scientifica è emerso come:

- manufatti a base di cemento
 - o la maggior parte delle aziende è ancora legata ad un sistema produttivo tradizionale;
 - o utilizzo prevalente di cemento Portland e di materie prime;
 - o utilizzo materie tendenzialmente locali a basso chilometraggio, in alcuni casi virtuosi anche ridottissimo;
 - o rari casi di utilizzo di materie prime seconde;
 - o ridotta implementazione di sistemi di produzione di energie rinnovabili;
- manufatti a base di argilla, mattoni e laterizi in generale

- altra percentuale di aziende che producono con metodologie tradizionali per rispondere alle esigenze di un mercato che richiede prodotti adeguati per lavorazioni di restauro;
- utilizzo prevalente di argilla naturale;
- utilizzo di cave vicine a ridotto chilometraggio;
- diffusa adozione di filtri;
- scarso utilizzo di fonti rinnovabili.

Concludendo, nonostante alcune realtà virtuose che si stanno convertendo ai principi dell'economia circolare, il sistema produttivo tradizionale è ancora caratterizzato da alte emissioni di GHG e lontano dai principi dell'economia circolare.

Sulla base dei risultati dedotti dal presente lavoro e con l'obiettivo di invertire questo trend, la fase successiva della ricerca prevedrà la collaborazione con alcune delle aziende individuate al fine di implementare, nei tradizionali processi produttivi, alcuni principi dell'economia circolare con l'obiettivo di favorire una transizione verso un modello di produzione più sostenibile e a basse emissioni di gas climalteranti.

References

- [1] A. Favier, C. De Wolf, K. Schrivener, and G. Habert, "A SUSTAINABLE FUTURE FOR THE EUROPEAN CEMENT AND CONCRETE INDUSTRY. Technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050," 2018.
- [2] European Commission, "Accordo di Parigi," 2015. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_it. [Accessed: 14-Nov-2018].
- [3] IPCC, "IPCC REPORT 2018," 2018.
- [4] F. Pomponi and A. Moncaster, "Circular economy for the built environment: A research framework," *J. Clean. Prod.*, vol. 143, pp. 710–718, 2017.
- [5] M. Geissdoerfer, P. Savaget, N. M. P. Bocken, and E. J. Hultink, "The Circular Economy – A new sustainability paradigm?," *J. Clean. Prod.*, vol. 143, pp. 757–768, 2017.
- [6] I. C. De los Rios and F. J. S. Charnley, "Skills and capabilities for a sustainable and circular economy: The changing role of design," *J. Clean. Prod.*, vol. 160, pp. 109–122, 2017.
- [7] K. Winans, A. Kendall, and H. Deng, "The history and current applications of the circular economy concept," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 68, no. October 2015, pp. 825–833, 2017.
- [8] European Commission, "COMM UE 302 16/6/2003," 2003.
- [9] MATTM, "D.lgs. 50/2016 - Criteri di sostenibilità energetica e ambientale." 2016.
- [10] Fondazione Symbola – Unioncamere, "GreenItaly Rapporto 2018," 2018.
- [11] SEC, "Scenari immobiliari," 2018.
- [12] ISTAT, "No Title," 2019. .
- [13] Banca D'Italia, "Economie regionali. L'economia del Lazio," Roma, 2018.
- [14] FEDERLAZIO, "Osservatorio sullo stato di salute dell'edilizia nel Lazio," 2018.

XIX Congresso Nazionale CIRIAF

Energia e Sviluppo Sostenibile

Temperature estreme ed inquinamento atmosferico: l'area urbana di Roma

Donatella Occhiuto ^{1,*}, Silvia Barberini ²

¹ ARPA Lazio, Centro Regionale della Qualità dell'Aria, Via Boncompagni 101, Roma

* Autore di riferimento. E-Mail: donatella.occhiuto@arpalazio.gov.it

Abstract: Con il termine “isola di calore urbano” si intende l’innalzamento delle temperature in area urbana come conseguenza delle attività antropiche che vi si svolgono e dei materiali con cui la città è costruita. Il fenomeno è conosciuto da tempo ed è stato quantificato in molte aree. Inoltre è stato dimostrato un rapporto diretto tra picchi di intensità dell’isola di calore e numero di decessi legati al caldo, a causa dell’incidenza del disagio termico sul sistema cardiovascolare e respiratorio. In aggiunta, è noto che inquinamento atmosferico ed elevate temperature agiscono sinergicamente e negativamente sulla salute, costituendo un problema di sanità pubblica. In questo lavoro si mostrano i risultati di una campagna di misure di temperatura condotta all’interno dell’area della città di Roma mediante l’uso di 30 sensori di temperatura. L’elaborazione dei dati mostra che le temperature sono più alte nella zona del centro e nell’area che si estende dal centro a sud-est, confermano le teorie sul clima urbano secondo cui la temperatura dell’aria aumenta dalle zone rurali verso il centro. Le stesse aree sono risultate essere maggiormente interessate dall’inquinamento atmosferico, rappresentando quindi zone di rischio sia per elevate temperature che per inquinamento.

Parole chiave: isola di calore urbano; inquinamento atmosferico; morfologia urbana.

1. Microclimatologia

I cambiamenti climatici sono al centro dell’attenzione scientifica e mediatica, in particolare per l’aumento globale delle temperature a cui si associano una serie di rischi ambientali e sanitari.

Una particolarità climatica dell’ambiente urbano è la frequente presenza di una anomalia di temperatura che prende il nome di isola di calore urbano (*Urban Heat Island* - UHI): una città presenta spesso valori di temperatura di qualche grado superiori rispetto all’ambiente rurale circostante, e

questa differenza può essere molto marcata. Il divario è particolarmente apprezzabile a partire da qualche ora dopo il tramonto, in quanto l'ambiente urbano comincia a raffreddarsi con notevole ritardo rispetto a quello rurale circostante, e più lentamente a causa del calore accumulato dagli edifici.

Il fenomeno dell'UHI è particolarmente dannoso per la salute umana nella stagione estiva in corrispondenza delle ondate di calore in quanto la temperatura dell'aria in città, oltre a raggiungere valori più elevati rispetto alle aree rurali circostanti nelle ore diurne, si mantiene elevata anche nelle ore notturne, riducendo la capacità di recupero dell'organismo umano dalle condizioni di estremo calore a cui è stato sottoposto durante il giorno [1].

Comprensibilmente non tutta la zona cittadina presenta la stessa alterazione termica; l'indicatore utilizzato per quantificare questo scostamento è l'intensità dell'isola di calore (*UHI Intensity*- UHI). Secondo Oke le zone cittadine caratterizzate da maggiore intensità sono probabilmente le aree ad alta concentrazione edilizia, che rappresentano le "cime" dell'isola nella mappatura tramite isoterme [2]. Conoscere all'interno della città le zone più calde durante le ondate di calore può essere un elemento importante per la modulazione della prevenzione e la realizzazione di un sistema di allarme graduato per aree di rischio. E' infatti plausibile che abitare nelle aree più calde della città sia un fattore di rischio che aumenti la suscettibilità alle ondate di calore.

L'ARPA Lazio e il Dipartimento di Epidemiologia del Lazio (DEP) hanno avviato nel 2016 un progetto di ricerca, finanziato dal Ministero della Salute, dal titolo "Uso innovativo dei dati satellitari per la stima di esposizioni ambientali finalizzate a valutare gli effetti sanitari delle temperature estreme e dell'inquinamento atmosferico a Roma". L'obiettivo è utilizzare i dati satellitari come nuovo strumento di stima delle esposizioni ambientali alle temperature elevate e all'inquinamento, sfruttando l'elevata risoluzione spaziale dei dati, per ottenere un sistema di allarme integrato per inquinamento e ondate di calore e graduato per aree di rischio. Il progetto si avvale delle seguenti risorse: immagini satellitari NASA della missione MODIS, dati epidemiologici sui ricoveri e sulla mortalità causa-specifica su 150.000 persone presenti all'interno di uno studio di coorte (lo Studio Longitudinale Romano, SLR), dati dell'inquinamento atmosferico forniti dalla rete di monitoraggio regionale e dal modello di dispersione degli inquinanti, valori della temperatura dello strato di aria più prossimo alla superficie (a livello dell'*Urban Canopy Layer*, avente estensione approssimativamente pari all'altezza media degli edifici), ottenuti da una campagna termometrica.

In questo rapporto si presentano i risultati della campagna termometrica condotta a Roma all'interno dell'autostrada A1 (Grande Raccordo Anulare), dal 1 luglio al 30 settembre 2018, mediante la collocazione di 30 sensori in posizioni rappresentative dell'area. Tali misure si sono aggiunte ai dati registrati nello stesso periodo dalla stazione micrometeorologica di Roma (via Boncompagni) e dalle 9 stazioni della rete chimica di monitoraggio della qualità dell'aria (figura 1).

La finalità del monitoraggio è integrare le immagini ottenute via satellite alla macroscale con i dati raccolti in prossimità del suolo, in modo da ottimizzare le informazioni delle immagini satellitari con condizioni di conteso più vicine al disagio percepito dai cittadini.

I campionatori sono costituiti da termometri (LogTag modello TRI-X-16) protetti da schermi solari passivi. I sensori (figura 2) sono stati posizionati in modo da minimizzare eventuali effetti microclimatici, individuando luoghi lontani da fonti dirette di calore (come ad esempio scarichi di

autovetture o riscaldamento domestico). Per facilitarne l'installazione sono stati scelti luoghi facilmente raggiungibili (come i balconi). I sensori termometrici scelti sono stati già utilizzati in analoghe ricerche estensive e sono impostati per accendersi automaticamente e rilevare la temperatura ogni 15 minuti.

Figura 1. Postazioni di misura della temperatura su Roma. Fonte: Google Maps.

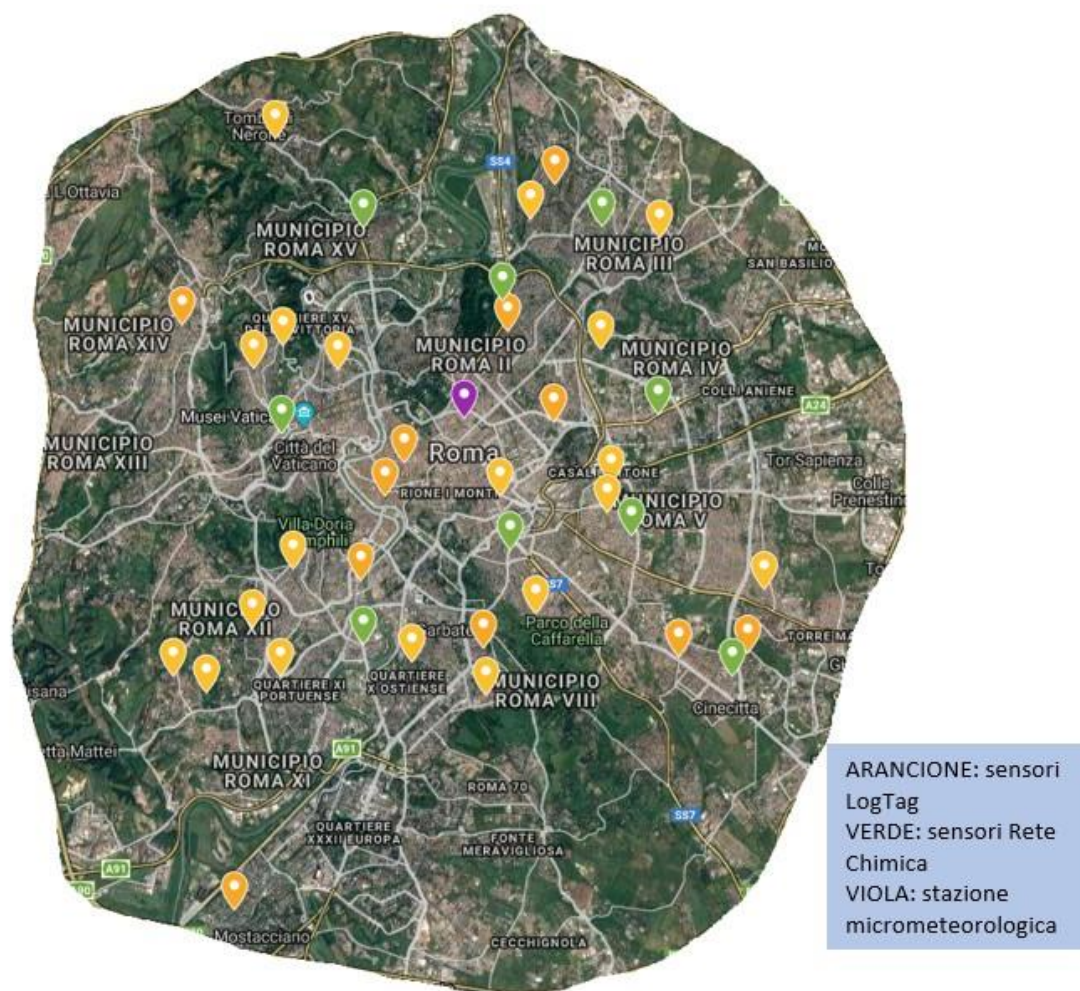


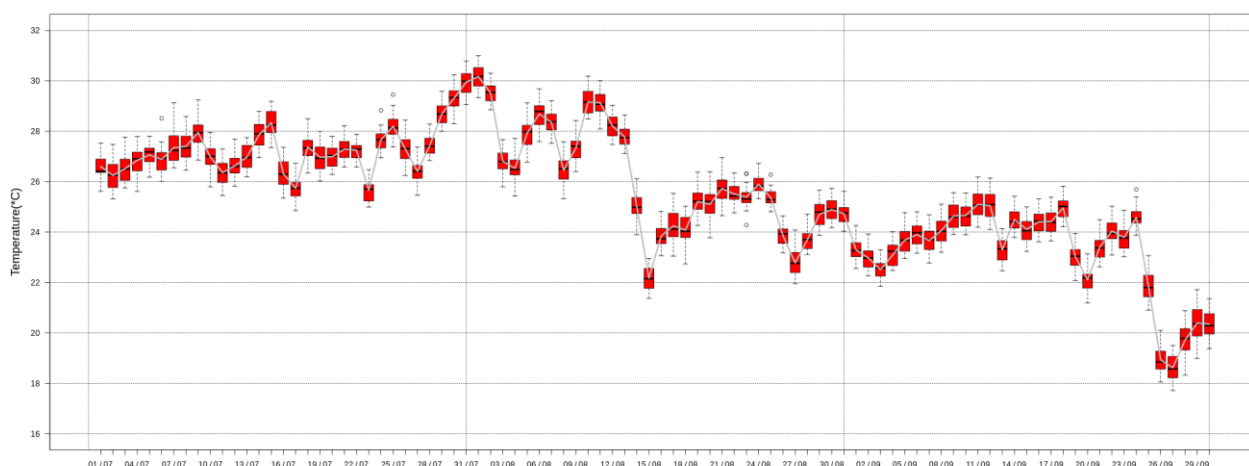
Figura 2. Sensore di temperatura su via del Corso. Fonte: ARPA Lazio.



2.1 Analisi dei dati

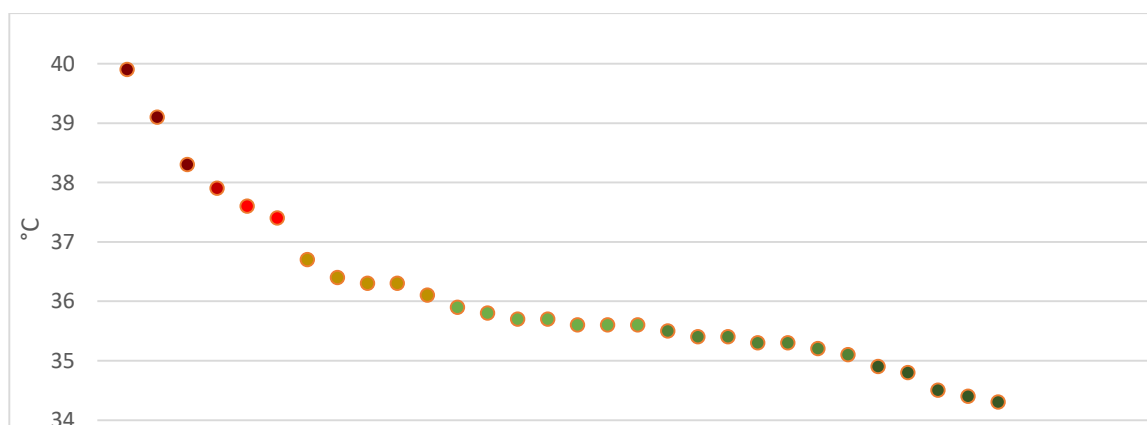
La finalità dell'analisi dei dati registrati dai campionatori e dalle centraline è lo studio del comportamento termico della città nella stagione estiva (mesi di luglio, agosto e settembre).

Gli andamenti della temperatura mostrano una diversificazione termica nelle diverse stazioni (figura 3). L'area in esame comprende siti molto diversi tra loro: zone con un livello di urbanizzazione modesto assimilabile a condizioni di bassa densità urbana, chiaramente differenti alle zone ad alta densità tipiche ad esempio del centro storico. L'entità dell'isola di calore urbana è riassunta nella tabella 1 come differenza di temperatura tra le diverse aree (ΔT) considerando i dati medi della temperatura media (med), massima (max) e minima (min), per i mesi di luglio (lug), agosto (ago) e settembre (set).

Figura 3. Andamento della temperatura media giornaliera del trimestre di studio.**Tabella 1.** Entità dell'isola di calore nel trimestre di studio.

Entità UHI	°C	Entità UHI	°C	Entità UHI	°C
ΔT_{med_lug}	1,64	ΔT_{med_ago}	1,73	ΔT_{med_set}	1,77
ΔT_{max_lug}	2,8	ΔT_{max_ago}	3,26	ΔT_{max_set}	3,09
ΔT_{min_lug}	3,39	ΔT_{min_ago}	3,38	ΔT_{min_set}	3,09

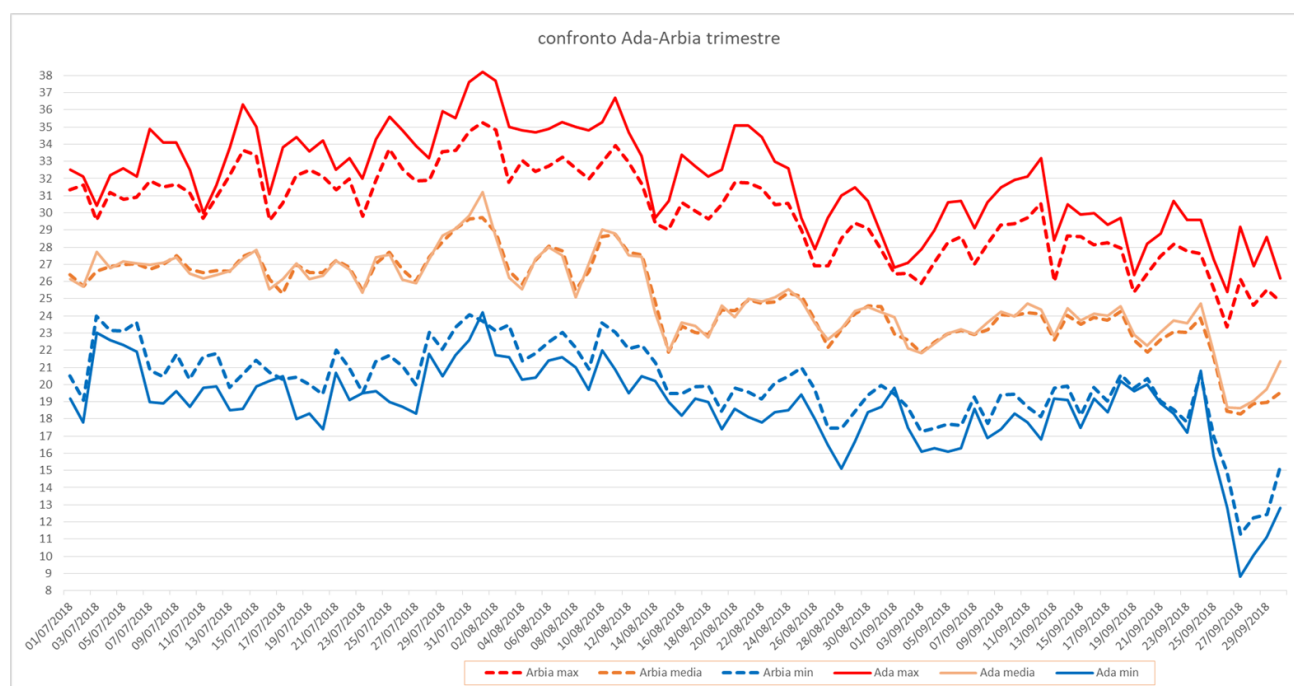
Come atteso, è dal confronto della media delle temperature minime che si rilevano le maggiori differenze: le isole di calore sono più evidenti di notte e prima dell'alba quando le differenze di raffreddamento radiativo sono massime tra centro e periferia. Appena il sole tramonta, l'inerzia termica del centro della città consente solo una lenta e costante discesa, mentre le zone più distanti dal centro e i parchi urbani perdono rapidamente calore, raggiungendo nelle prime ore del mattino la massima differenza con il centro. L'intensità dell'isola di calore (UHI) assume tuttavia valori maggiori se il confronto viene fatto su dati puntuali. I 30 sensori utilizzati restituiscono dati ogni 15 minuti, permettendo quindi di individuare il momento più caldo della giornata: il record di temperatura è stato raggiunto il 01 agosto alle ore 14:30, con una differenza di temperature tra i due estremi di 5,6°C (figura 4).

Figura 4. Temperatura registrata il 01 agosto alle ore 14:30.

2.2 Confronto tra sensori vicini

Viene riportato in figura 5 il confronto tra i dati registrati dal sensore posizionato a via Arbia e quello presente nella centralina della rete chimica della qualità dell'aria ubicato all'interno del parco di villa Ada. Tali sensori, nonostante siano distanti in linea d'aria solo 600 metri, mostrano un andamento termico molto diverso, dovuto all'azione mitigatore del parco urbano. Le aree verdi, com'è noto, contribuiscono infatti a migliorare il microclima urbano [3]. Di notte la temperatura più bassa si registra nel parco di Villa Ada in quanto i suoli con vegetazione erbacea si raffreddano più velocemente delle aree asfaltate, perdendo calore per effetti radiativi, ma la situazione cambia subito dopo il sorgere del sole: la temperatura nelle aree verdi, infatti, tende ad aumentare molto più velocemente rispetto a quella degli ambienti stradali a causa della diversa resistenza termica dei materiali che li caratterizzano (figura 5).

Figura 5. Confronto sensori Ada e Arbia.



3. Indici di estremi di temperature calde

Al fine di analizzare gli eventi termici estremi e la presenza di eventuali tendenze significative, sono stati analizzati gli indici “estremi di caldo”, definiti dall'*Expert Team on Climate Change Detection and Indices* (ETCCDI) [4]. Per ottenere tali valori, è stata utilizzata come serie climatologica di riferimento la serie di dati decennale 2008-2017 della stazione della rete Arsal di via Lanciani. L'indicatore “notti tropicali” (TR20) esprime il numero di giorni con temperatura minima superiore a 20°C, l'indicatore “notti estive calde” (TXD90p) esprime il numero di notti con temperatura minima superiore al 90° percentile della statistica delle minime giornaliere sul periodo climatologico di riferimento, mentre l'indicatore “giorni estivi caldi” (TND90p) indica il numero di giorni con temperatura massima superiore al 90° percentile della statistica delle massime giornaliere sul periodo climatologico di riferimento. Altro valore rilevante è il numero di giornate con temperatura giornaliera massima maggiore o uguale a 35°C.

Tabella 2. Indici di estremi di temperature calde, valori in giorni.

SENSORI (numero)	notti tropicali (TR20)	notti estive calde (TXD90p)	giorni estivi caldi (TND90p)	giorni con $t_{max} \geq 35^{\circ}\text{C}$
1	82	64	53	13
2	73	48	53	17
3	75	53	49	13
4	75	54	46	10
5	76	50	33	4
6	79	56	48	8
7	76	58	30	3
8	77	49	43	7
9	57	31	49	20
10	56	30	39	10
11	65	40	36	8
12	55	30	47	11
13	76	54	26	2
14	77	52	24	1
15	63	38	51	26
16	67	43	31	7
17	56	30	43	5
18	61	35	25	1
19	54	32	35	5
20	62	38	21	1
21	26	13	46	15
22	57	29	30	3
23	47	22	32	3
24	63	41	29	3
25	46	27	18	1
26	23	11	37	5
27	29	11	30	2
28	62	37	42	4
29	59	37	32	3
30	60	37	25	2
31	72	48	52	22
32	72	50	35	5
33	64	39	31	4
34	37	19	35	3
35	74	47	23	2
36	65	41	27	3
37	68	49	33	8
38	72	46	30	3
39	68	42	14	0
40	59	36	31	3

I valori confermano l'andamento termico diversificato nelle varie zone della città: ad esempio l'indice notti tropicali varia tra un minimo di 23 e un massimo di 82 notti, indicando che ci sono aree della città in cui, per 82 notti su un totale di 92 presenti nella stagione estiva di studio, la temperatura non scende al di sotto dei 20°C. Questo dato è molto importante perché evidenzia come in determinate zone le persone, soprattutto se anziane, siano potenzialmente più esposte agli effetti del caldo durante le ondate di calore, con evidenti rischi sanitari.

4. Morfologia urbana

Al fine di studiare le caratteristiche morfologiche e fisiche del sistema urbano, sono stati presi in considerazione indicatori rappresentativi della morfologia urbana come le superfici permeabili e impermeabili e la presenza di aree verdi, evidenziando le differenze tra i vari siti campione, alcuni caratterizzati da un tessuto denso e compatto con ridotte superfici destinate a verde e altri contraddistinti da una edilizia a media-bassa densità con ampie superfici ricoperte di vegetazione.

La superficie del Comune di Roma è di 1.285 Km², con una popolazione di circa 2.876.614 unità (dati al 31/12/2017) [5].

Il territorio capitolino è suddiviso in 15 municipi, territori con caratteristiche molto differenti tra loro sia in termini di estensione, di popolazione residente, di densità abitativa e di livelli di consumo di suolo. I municipi di Roma sono equiparabili, per estensione territoriale e popolazione, a città italiane di media grandezza. La dimensione demografica media è di circa 192.000 abitanti; il municipio più popoloso è il VII, con un numero di abitanti pari a 307.839, mentre il meno popoloso è l'VIII con 131.075 abitanti [5]. La densità abitativa media è di circa 2.235 abitanti per Km², con picchi nei municipi I, II e V, nei quali la densità raggiunge circa i 9.000 ab/km² (circa 4 volte la densità media). Gli stessi municipi, come evidente nella tabella 3, hanno le percentuali più importanti di consumo di suolo (74,4%, 68,4% e 63,1%) [6]. Il consumo di suolo è un fenomeno associato alla perdita di una risorsa ambientale di primaria importanza, dovuta all'occupazione di superficie che originariamente era agricola o naturale con copertura artificiale dovuto alla costruzione di nuovi edifici, fabbricati e insediamenti, all'espansione delle città, alla densificazione o alla conversione di terreno entro un'area urbana, all'infrastrutturazione del territorio. Nella città di Roma la superficie di suolo consumato è pari al 23.5% (quasi un quarto della superficie totale), pari a 30.241 ettari [6]. Il consumo di suolo viene solitamente espresso come superficie impermeabilizzata, che rappresenta la somma delle superfici edificate e pavimentate. I suoli impermeabilizzati sono causa di una maggiore quantità di radiazione solare assorbita, determinando un aumento della temperatura dell'aria e del fenomeno dell'UHI. Un recente studio sulle città di Roma, Milano, Firenze e Bologna ha rilevato correlazioni statisticamente significative tra superfici impermeabilizzate e temperatura superficiale: si stima infatti un aumento della temperatura media di 0,6°C ogni 20 ettari per km² di suolo consumato, tale aumento risulta essere ancora più elevato nel periodo estivo (0.9 °C/20 ha/km²) [7]. L'impermeabilizzazione dei suoli causa una perdita significativa di evapotraspirazione (effetto combinato di evaporazione di acqua dal suolo e traspirazione delle piante), dunque del naturale effetto refrigerante, assorbendo parte del calore dell'aria e quindi facendo aumentare ancora la temperatura in città. Inoltre, la forte presenza di

superfici edilizie comporta un consistente immagazzinamento di radiazione solare, diretto e diffuso, durante le ore calde del giorno con conseguente rilascio termico nelle ore notturne.

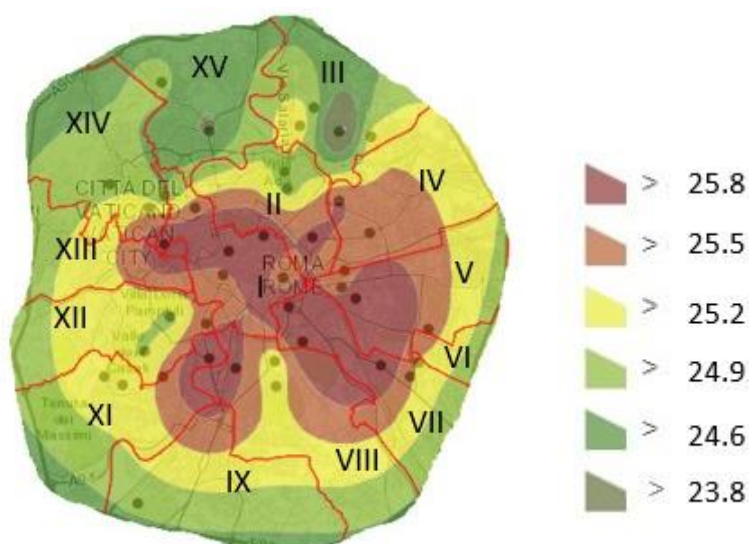
Tabella 3. Consumo di suolo e densità abitativa di Roma Capitale per municipi.

Municipi	Suolo consumato (%) dati del 2017	Densità abitativa (ab/km ²) al 31/12/2017
I	74,38	8.991,4
II	68,42	8.567,1
V	63,11	9.207,4
VII	52,02	6.714,8
IV	39,17	3.611,7
XI	27,70	2.183,8
VI	27,60	2.274,4
VIII	24,05	2.776,3
XII	23,14	1.930,8
III	18,95	2.095,8
X	18,74	1.537,4
XIII	18,17	1.995,9
IX	17,58	998,8
XV	14,34	858,7
XIV	12,78	1.440,4

Gli apporti termici degli edifici vengono accentuati dalla geometria urbana che presenta strade relativamente strette rispetto allo sviluppo verticale degli edifici. Questi canyon urbani impediscono la ventilazione e il raffrescamento, incrementando la riflettanza delle radiazioni tra edifici e fondo stradale. A questo è dovuto il perdurare dell'UHI anche di notte.

Nella figura 6 è rappresentata l'isola di calore ottenuta attraverso l'interpolazione dei dati della campagna termometrica. Emerge che i municipi più caldi sono quelli a maggior densità abitativa e a maggior percentuale di consumo di suolo.

Figura 6. Interpolazione dei dati della campagna termometrica. Fonte: elaborazione propria.



5. Inquinamento atmosferico

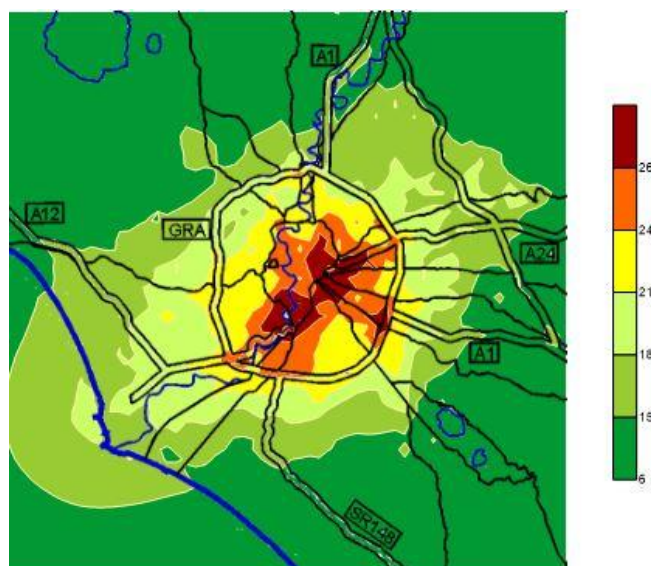
E' noto che inquinamento atmosferico (in modo particolare, i livelli di ozono e di PM10) e temperature elevate agiscono sinergicamente e negativamente sulla salute, incrementando il tasso di mortalità [8]. Le aree urbane, oltre ad essere interessate dal fenomeno dell'UHI, sono caratterizzate da maggiori concentrazioni nell'aria di aerosol, pulviscolo atmosferico composto in prevalenza da inquinanti atmosferici di origine antropica (traffico, processi industriali, processi di combustione). L'innalzamento delle temperature in città comporta, inoltre, un consistente utilizzo dei sistemi di climatizzazione che grava sulla percentuale di anidride carbonica presente in atmosfera. Tale situazione è peggiorata dalla scarsa presenza di aree verdi urbane: la componente vegetale riduce l'effetto Isola di calore abbassando le temperature, migliora la qualità dell'aria diminuendo la percentuale di anidride carbonica e di particolato e ricrea micro-sistemi in città. L'Organizzazione Mondiale della Sanità stima che ogni anno 4,3 milioni di decessi nel mondo siano attribuibili all'inquinamento. Secondo il rapporto 2018 dell'Agenzia Europea per l'Ambiente "Qualità dell'aria in Europa", l'inquinamento atmosferico causa 518.700 morti premature in Europa ogni anno [9].

Tra gli inquinanti atmosferici, il particolato è quello con il maggior impatto sulla salute umana. Vari studi epidemiologici sugli effetti sanitari dell'inquinamento atmosferico da particelle hanno evidenziato associazioni tra le concentrazioni in massa del PM10 e un incremento sia di mortalità che di ricoveri ospedalieri per malattie cardiache e respiratorie nella popolazione. Anche l'incremento di tumore polmonare è stato associato all'inquinamento ambientale, ed in particolare alla frazione fine dell'aerosol: il materiale particolato aerodisperso è stato inserito dall'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC) tra i cancerogeni di gruppo 1 (agenti sicuramente cancerogeni per l'uomo).

La direttiva 2008/50/CE, recepita in Italia con il d.lgs. 155/2010, stabilisce per il PM10, ai fini della protezione della salute umana, un valore limite annuale di 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e un valore limite giornaliero di 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ da non superare più di 35 volte in un anno.

Nella figura 7 sono mostrati i livelli di concentrazione media annua del PM10 (anno 2018) ottenuti con il sistema modellistico dell'ARPA Lazio.

Figura 7. Elaborazione grafica della concentrazione media annua del PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]. Fonte: elaborazione propria.

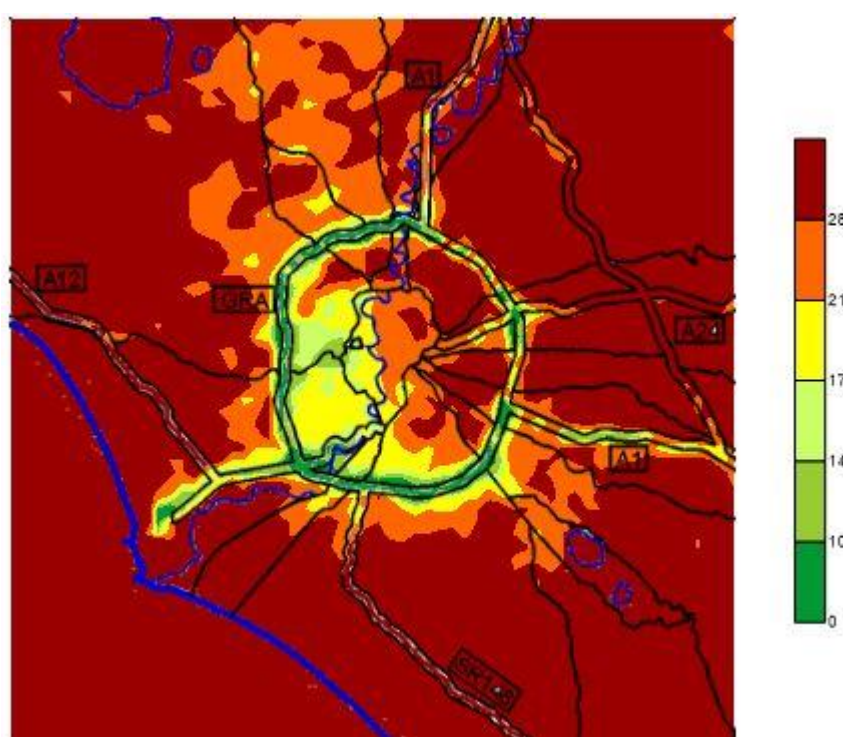


L'ozono troposferico (O_3) è un inquinante secondario che si forma attraverso processi fotochimici in presenza di inquinanti precursori (quali gli ossidi d'azoto e i composti organici volatili). Dopo il particolato, l'ozono è l'inquinante atmosferico che, per tossicità e per i livelli di concentrazione che possono essere raggiunti, incide maggiormente sulla salute umana. Può causare seri problemi anche all'ecosistema, all'agricoltura e ai beni materiali.

Il d.lgs. 155/2010 definisce per l'ozono ai fini della protezione della salute umana un obiettivo a lungo termine (OLT, pari a $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, calcolato come valore massimo giornaliero della media della concentrazione di ozono su 8 ore consecutive), una soglia di informazione ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e una soglia di allarme ($240 \mu\text{g}/\text{m}^3$) entrambe come media oraria. La formazione dell'ozono è dipendente dall'intensità dell'irradiazione solare; è pertanto un inquinante stagionale caratteristico della stagione estiva e delle ore più calde.

Nella figura 8 sono mostrati i dati relativi al numero di superamenti dell'obiettivo a lungo termine per la protezione della salute umana dell'ozono (media massima giornaliera calcolata su 8 ore superiore a $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Figura 8. Elaborazione grafica dei dati relativi al numero di superamenti dell'ozono rispetto all'OLT per l'anno 2018. Fonte: elaborazione propria.



Come evidente dalle figure 7 e 8, non tutte le zone cittadine sono soggette allo stesso grado di inquinamento. Nelle aree urbane l'inquinamento atmosferico è in relazione con la densità di popolazione e i flussi di traffico: per questo generalmente la concentrazione del PM10 è maggiore nelle aree urbane rispetto a quelle suburbane e rurali limitrofe. Nella figura 7 emerge che le zone a maggior inquinamento da PM10 sono quelle del centro. L'ozono, invece, si comporta in modo opposto, in relazione alle particolari dinamiche di formazione.

Al livello del suolo la molecola di ozono si forma quando altri inquinanti, principalmente ossidi di azoto e composti organici volatili, reagiscono a causa della presenza della radiazione solare. Le sorgenti di questi inquinanti detti precursori dell'ozono sono di tipo antropico (i veicoli a motore, le centrali termoelettriche, le industrie, i solventi chimici, i processi di combustione), e di tipo naturale, quali boschi e foreste, che emettono sostanze organiche volatili molto reattive. La dinamica di formazione dell'ozono e degli altri inquinanti fotochimici è tale per cui grandi masse d'aria possono spostarsi anche a decine e centinaia chilometri di distanza dalle fonti di emissione degli inquinanti precursori. In prossimità di sorgenti di monossido di azoto (NO), emesso ad esempio dai veicoli a motore, l'ozono può essere significativamente consumato dalla reazione $O_3 + NO \rightarrow NO_2 + O_2$. Questo spiega perché i valori più elevati di ozono si raggiungono in zone rurali.

6. Conclusioni

I dati acquisiti dalle diverse stazioni hanno permesso di determinare l'entità dell'effetto UHI, di osservarne le dinamiche temporali e l'evoluzione nel corso delle ore.

E' emerso che l'intensità dell'isola di calore urbano è legata alla distanza dal centro, alla densità abitativa ed al consumo di suolo, quindi è maggiore soprattutto nel centro storico e nell'area che si estende dal centro a sud-est. Le stesse aree risultano essere quelle maggiormente interessate dall'inquinamento atmosferico.

I risultati di questo lavoro saranno utilizzati per migliorare il sistema di previsione e allarme caldo (*Heat Health Watch Warning System*, HHWWS) del DEP, attivo da maggio a settembre, che prevede, fino a 72 ore di anticipo, il verificarsi di condizioni climatiche a rischio per la salute della popolazione [10]. Il sistema di allarme congiunto per inquinamento ed ondate di calore (in fase di definizione) costituirà uno strumento di prevenzione e protezione, in grado di assicurare ai cittadini che vivono nelle zone a rischio interventi mirati a evitare e ridurre eventi avversi.

Bibliografia

1. Kalkstein L.S. Health and climate change. Direct impact in cities. *Lancet*, **1993**, 342, 1397-1399.
2. Oke T.R. The energetics basis of urban heat island. *Quar.J.Roy.Meteorol.Soc.*, **1982**, 108, pp.1-24.
3. Petralli M.; Prokopp A.; Morabito M.; Bartolini G.; Torrigiani T.; Orlandini S. Ruolo delle aree verdi nella mitigazione dell'isola di calore urbana: uno studio nella città di Firenze. *Rivista Italiana di Agrometeorologia*, **2006**, 1, 51-58.
4. Peterson T.C.; Folland C.; Gruza G.; Hogg W.; Mokssit A.; Plummer N. Report on the activities of the working group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs 1998-2001. *ICPO*, **2001**, No. 48.
5. Dipartimento Trasformazione Digitale U.O. Statistica - Open Data. La popolazione di Roma. Struttura e dinamica demografica. Anno 2017. Roma Capitale, **2018**.
6. Rapporto del Servizio Civile Nazionale. Il consumo di suolo di Roma Capitale. Rapporto 2018, **2018**.
7. Morabito M.; Crisci A.; Messeri A.; Orlandini S.; Raschi A.; Maracchi G.; Munafò M. The impact of built-up surfaces on Land Surface Temperatures in italian urban areas. *Science of the total environment*, **2016**, 551, 317-326.

8. Analitis A.; De' Donato F.; Scortichini M.; Lanki T.; Basagana X.; Ballester F.; Astrom C.; Paldy A.; Pascal M.; Gasparrini A.; Michelozzi P.; Katsouyanni K. Synergistic Effects of Ambient Temperature and Air Pollution on Health in Europe: Results from the PHASE Project. *Int J Environ Res Public Health*, **2018**, 15(9).
9. Sito dell'European Environment Agency, consultabile online: <https://www.eea.europa.eu>
10. Sito del Dipartimento di Epidemiologia del Lazio, consultabile online: <https://www.deplazio.net>

XIX Congresso Nazionale CIRIAF

Energia e Sviluppo Sostenibile

Esposizione ad amianto: Innovativi approcci multimetodici per decifrare i meccanismi di azione patogenetici

Paola Comodi^{1,*}, Patrizia Garofani², Valentina Dottorini³, Luca Bartolucci¹, Umberto Susta¹ and Azzurra Zucchini¹

¹ Dipartimento di Fisica e Geologia, Università degli Studi di Perugia

² Dipartimento di Prevenzione, Asl Umbria 1, Perugia

³ Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pisa

* Autore di riferimento. E-Mail: paola.comodi@unipg.it

Abstract: Asbestos cancerogenicity has been widely proven in several epidemiologic studies, but the mechanisms that determine their toxicity are still not well understood. Even though asbestos have been banned in many countries (in Italy, Legge 257/92), because of their long latency, the diseases associated with them are still an important emergency both from a sanitary and a social point of view, due to the dangerous effects in work environments but also in normal life.

Recent studies have shown that this group of minerals are dangerous not only because of their inhalability, and hence their aspect/ratio, but also because of their structure and chemical composition, for example their iron content. This hypothesis has been suggested based on the presence of asbestos bodies which coat the inhaled fibres found within the lungs of exposed patients. Top-notch studies, by means of micro-infrared spectroscopy, micro-diffraction and micro-fluorescence with synchrotron light sources, have the aim of (i) characterizing from a chemical-physical point of view the asbestos bodies, (ii) understanding if there are crystal-chemical and structural changes of the fibers within the lung tissue and (iii) understanding if the pathogenic load changes across the different asbestos species (Pascolo et al. 2015). This work shows the results of the study of a series of autopsic human lung parenchyma samples, where composition and morphology have been observed in order to understand if there is any relation between the chemical-physical properties of the fibers and their pathogenicity.

Preliminary data show how most of the fibers observed belong to the amphiboles mineralogic group, containing iron, while chrysotile fibers are rare. The asbestos bodies, which can have different shape and distribution are associated with minerals such as ferrihydrite.

Keywords: asbestos bodies; fibers in human lung parenchyma; asbestos pathogenicity.

1. Introduzione

Amianto (o asbesto) è il nome generico per sei varietà di silicati fibrosi che a loro volta possono essere suddivisi in due classi: anfiboli e serpentino. La prima classe include le specie actinolite, amosite, antofillite, crocidolite e tremolite, la seconda solamente il crisotilo.

Questi minerali sono stati largamente utilizzati a partire dalla rivoluzione industriale per via delle loro eccellenti proprietà fisico-chimiche. Sono migliaia i tipi di manufatti in cui si è utilizzato l'amianto prima che studi epidemiologici effettuati sull'esposizione professionale mettessero in evidenza la cancerogenicità delle sei specie minerali. La loro pericolosità consiste nel fatto che hanno la tendenza a frammentarsi in fibre talmente piccole da poter essere inalate dagli esseri umani, causando patologie quali asbestosi, cancro ai polmoni e mesotelioma.

Nel 2009 l'agenzia IARC (International Agency for Research on Cancer) ha confermato la cancerogenità dell'amianto, già introdotta nel 1992, inserendolo nel gruppo 1 come cancerogeno certo per i distretti polmone, pleura, laringe e ovaio. I meccanismi biologici associati alla permanenza dell'amianto nell'organismo ormai appurati consistono in una risposta infiammatoria dovuta al rilascio di citochine, fattori di crescita e sostanze ossidanti da parte dei macrofagi alveolari nel tentativo di distruggere le fibre, seguita dalla morte cellulare dei macrofagi che rilasciano nuovamente la fibra e diversi mediatori che richiamano altri macrofagi. Il processo infiammatorio così mantenuto provoca fibrosi diffusa sulla parete bronchiale ed alveolare, determinando l'asbestosi ed in alcuni casi favorendo l'insorgenza del carcinoma polmonare e del mesotelioma pleurico.

Data la sua biopersistenza, la tossicità dell'amianto può manifestarsi da 20 a 40 anni dopo l'esposizione, per questo motivo nonostante sia stato bandito negli anni 90 rimane ad oggi un importante problema. Sulla base delle quantità di amianto utilizzate negli scorsi decenni, sono stati sviluppati dei modelli di previsione del trend del numero di casi di mesotelioma prevedibili nel nostro paese (Marinaccio; 2005). Secondo questi studi si pensa che il picco di mortalità si stia verificando proprio in questi anni e che ci si debba aspettare che il numero di decessi rimanga di una certa rilevanza fino ad almeno il 2030.

In Italia l'amianto è stato messo al bando con la Legge n.257 del 12 Marzo 1992 secondo un programma di dismissione di durata biennale, in base al quale al 28 Aprile 1994 ne era vietata l'esportazione, la commercializzazione, la produzione e qualsiasi utilizzo in prodotti commerciali. E' stato stimato che nel nostro paese dal 1946 al 1992 siano state prodotte 3.748.550 tonnellate di amianto e che ne siano state importate 1.900.885 principalmente da Australia, Canada e Sud Africa.

La mappatura dei siti in cui sono presenti i materiali contenenti amianto (MCA) in Italia è incompleta, mancano infatti i dati di Basilicata, Sicilia e Liguria. I dati parziali forniti da Regioni e Province autonome nel 2015 indicano circa 37.000 siti, per i quali viene calcolato un ammontare di circa 60 milioni di mq di amianto presenti nel nostro paese. Ad Aprile 2018 Legambiente denuncia una grave carenza di impianti per lo smaltimento di MCA, con solo otto regioni dotate di impianti controllati, nonostante la legge preveda una discarica per ogni regione. Lo smaltimento dell'amianto ha un costo che va dai 250 ai 300 Euro per tonnellata, contro i circa 100 Euro per il trasporto e lo smaltimento all'estero. Dati del 2016 ci indicano che oltre il 70% dei rifiuti contenenti amianto (RCA) vengono esportati in Germania ed Austria.

Secondo le stime dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) nel 2010 più di 107.000 persone sono morte di tumore polmonare, mesotelioma e asbestosi causate da esposizione lavorativa da amianto. In generale le categorie di lavoratori particolarmente esposti sono i lavoratori edili, gli idraulici, gli elettricisti, i lavoratori navali ed in particolari condizioni i vigili del fuoco. L'INAIL dispone di un registro per i mesoteliomi in Italia, secondo i dati raccolti fra il 2003 ed il 2014, i morti per mesotelioma nel nostro paese ogni anno sono circa 1000, con un costo quantificato in circa 2 miliardi di Euro all'anno.

Ad oggi i problemi principali relativi alla gestione del problema amianto sono: la bonifica dei grandi siti di interesse nazionale, come ad esempio la più grande cava di amianto d'Europa a Balangero (TO) o gli stabilimenti Eternit di Priolo (SR) e Bagnoli (NA); l'incremento del numero di impianti di smaltimento, con l'obiettivo di averne almeno uno per regione; e lo sviluppo di tecnologie per la inertizzazione di MCA ai fini di un loro riutilizzo sostenibile.

Non secondarie sono le situazioni di emergenza causate dai disastri naturali come uragani, terremoti, alluvioni ed incendi, spesso caratterizzate contemporaneamente da un maggiore rischio e da una minore tutela per la popolazione. Il maggiore rischio si verifica a causa della liberazione di fibre durante i crolli o durante la rimozione delle macerie in cui siano presenti MCA. Ad aggravare ulteriormente la situazione concorre il fatto che i MCA che contaminano i rifiuti inerti sono difficili da separare e selezionare e quindi da smaltire correttamente. Per questi motivi, in circostanze di emergenza, ci si vede spesso costretti ad attuare deroghe alle leggi, con una minore tutela sia per la popolazione che per i soccorritori, che possono andare incontro a significativi rischi di esposizione a fibre di amianto.

2 Materiali e metodi

Lo scopo del presente lavoro è quello di studiare la composizione delle fibre di amianto contenute in una serie di reperti autoptici di parenchima polmonare umano di persone che presentavano patologie riconducibili all'esposizione ad amianto, per capire se esistono relazioni tra proprietà chimico-fisiche delle fibre e azioni biologiche. Contemporaneamente si intende contribuire a comprendere i meccanismi che si verificano quando le fibre di amianto permangono nei polmoni e le modificazioni sia da un punto di vista chimico che morfologico che possono intervenire.

Vengono analizzati sei differenti campioni di tessuto polmonare, provenienti dal Centro di Microscopia Ottica di ARPA Lombardia di Milano. Tre di questi hanno subito un trattamento di digestione chimica con ipoclorito di sodio (NaClO) presso il Dipartimento di Fisica e Geologia dell'Università di Perugia, mentre i restanti sono stati trattati mediante plasma-asher a Milano.

Le sospensioni sono state filtrate per mezzo di membrane in policarbonato per l'analisi al microscopio elettronico (SEM) e con membrane agli esteri di cellulosa per le osservazioni al microscopio ottico.

L'analisi morfologica al SEM dei campioni digeriti è stata corredata di analisi con spettrometro a dispersione di energia (EDS), in modo da avere una caratterizzazione composizionale delle fibre come stabilito dai criteri della WHO (World Health Organization). In questo studio si è deciso di seguire il

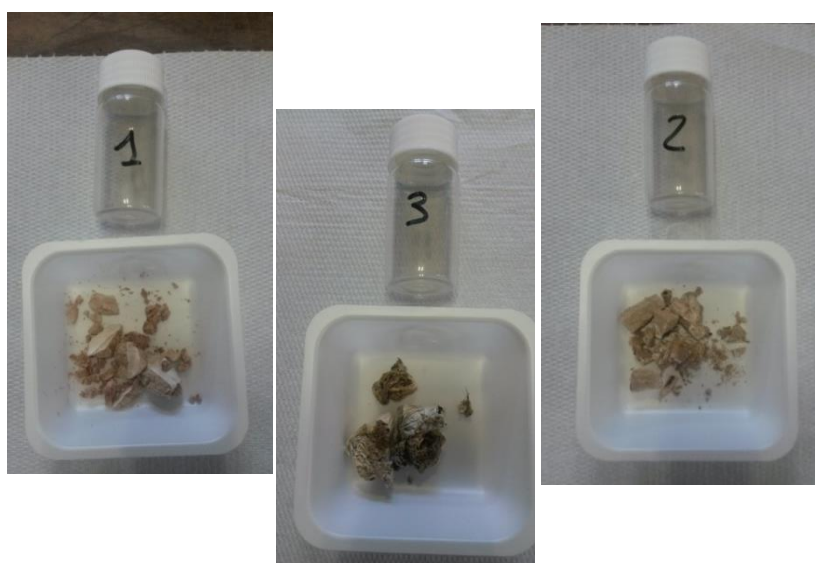
protocollo del 2006 proposto da Belluso et al. Il trattamento effettuato sui campioni non altera né la chimica né la dimensione delle fibre.

2.1 Digestione chimica

La preparazione del tessuto polmonare eseguita in questo lavoro, ha previsto due fasi: digestione (eliminazione della parte organica) e filtrazione.

La digestione dei primi tre campioni di tessuto polmonare secco (Fig.1) è stata effettuata per via chimica presso i laboratori del Dipartimento di Fisica e Geologia dell'Università degli Studi di Perugia.

Figura 1. Campioni di tessuto polmonare liofilizzato prima del trattamento di digestione chimica con ipoclorito di sodio.



Circa 0,300g di ogni campione sono stati immersi in un becker di vetro contenente 100ml di ipoclorito di sodio (NaClO) al 12% in cloro attivo (Cl_2), a cui sono state aggiunte quattro gocce di perossido di idrogeno per accelerare la digestione. I campioni sono poi stati messi in stufa a 60°C per circa 72 ore, in modo tale da effettuare una completa digestione del materiale prelevato. In questo arco di tempo il liquido è stato agitato con una frequenza di tre volte al giorno, per rendere omogenea la sospensione e far sì che si sciogliessero i cristalli di NaCl che si erano formati come precipitato dell'ipoclorito di sodio. Dato che i cristalli di cloruro di sodio avrebbero potuto inglobare tessuto polmonare e di conseguenza le fibre, i campioni sono stati riscaldati in stufa a circa 100°C per poter sciogliere i cristalli stessi. La sospensione ottenuta per ogni campione è stata riportata a 150ml, diluendola con 100ml di acqua bidistillata tiepida; 75ml sono stati filtrati con un apposito apparato di filtrazione su membrana in policarbonato avente $0,8\mu\text{m}$ di porosità e 25mm di diametro, per l'analisi

in microscopia elettronica; mentre i restanti 75ml sono stati filtrati su membrana di esteri misti di cellulosa avente 3µm di porosità e 25mm di diametro, per l'analisi in microscopia ottica.

I filtri per lo studio in microscopia elettronica sono stati asciugati in stufa a 50°C per quattro ore, mentre quelli preparati per la microscopia ottica solamente per un'ora.

2.2 *Trattamento mediante plasma asher*

Nel trattamento dei restanti tre campioni la fase di digestione è avvenuta per mezzo di incenerimento con metodo plasma asher presso il Centro di Microscopia Elettronica UO Aria, Dipartimento di Milano - ARPA Lombardia, accreditato e specializzato da anni nel trattamento e analisi di parenchima polmonare umano contenente fibre e corpuscoli di amianto.

I tre campioni liquidi, sono stati ottenuti mediante l'utilizzo di un inceneritore al plasma di ossigeno (plasma asher). Questo strumento lavorando sottovuoto e a circa 60-70°C consente di fluire ossigeno che tramite una radiofrequenza, unita alle condizioni di pressione e temperatura, trasforma il gas (O₂) in plasma, in queste condizioni la materia organica viene incenerita e rimossa. I tre campioni sono stati preparati ciascuno partendo da 0,02g di tessuto polmonare disidratato.

L'operazione di filtrazione è stata effettuata per metà su membrana Millipore in polycarbonato avente 0,8 µm di porosità e 25 mm di diametro per la microscopia elettronica; mentre i restanti 25 ml sono stati filtrati su membrana di esteri misti di cellulosa avente 3 µm di porosità e 25 mm di diametro per l'analisi in microscopia ottica.

2.3 *Microscopia ottica*

I filtri agli esteri misti di cellulosa utilizzati per l'analisi in microscopia ottica sono stati preparati con la procedura comunemente usata per il materiale aerodisperso, la diafanizzazione, un processo chimico attraverso il quale il campione viene reso sufficientemente trasparente da consentire il passaggio del fascio di luce del microscopio ottico e di conseguenza la visualizzazione del contenuto della membrana da parte dell'operatore. La diafanizzazione è stata effettuata con il metodo OMS del 1997: metodo acetone-triacetina per fibre con indice di rifrazione superiore a 1,51. Il principio di questo metodo è esporre il filtro a vapori di acetone che condensando sul filtro stesso ne fanno collassare i pori, rendendolo trasparente. L'acetone viene vaporizzato con apposito "diafanizzatore": tramite una siringa 0,25 ml di acetone vengono iniettati nello strumento, che lo vaporizza attraverso un orifizio al di sotto del quale è posto il vetrino da microscopia con appoggiato il filtro, che viene così diafanizzato. Essendo l'indice di rifrazione delle fibre inorganiche di amianto superiore a 1,51, sono state utilizzate alcune gocce di triacetina (triacetato di glicerolo) depositate sul filtro per fornire il contrasto ottimale, come stabilito dall'OMS.

Il microscopio ottico utilizzato per le analisi presentate in questo lavoro è un Olympus BX41.

La tecnica di microscopia ottica, applicata a questo tipo di problematiche, presenta alcuni limiti: non consente di distinguere i corpuscoli di asbesto da quelli formati su fibre artificiali, poiché il

microscopio ottico non permette di analizzare chimicamente il campione; non consente di individuare fibre visibili ad ingrandimenti superiori a 500X.

In questo studio l'analisi quantitativa di fibre e corpuscoli è stata effettuata ad un nicol in campo chiaro.

2.4 Microscopia elettronica

I filtri sono stati metallizzati con oro-palladio, al fine di ottimizzare l'individuazione anche di fibre molto sottili.

Il SEM (Scanning Electron Microscope) utilizzato per le analisi presentate in questo lavoro è un Philips 515 dotato di un doppio sistema di rivelazione, uno per gli elettroni secondari (SE) e uno per gli elettroni retro diffusi, detti Back Scattered Electrons (BSE). Con questo strumento è possibile ottenere ingrandimenti fino a 20000X.

Le analisi chimiche sono state effettuate con un rivelatore a dispersione di energia EDS (Energy Dispersive System). Le analisi realizzate con il SEM unito al rivelatore EDS, sono da considerarsi di carattere semi-quantitativo: consentono di acquisire in tempi rapidi lo spettro di emissione completo e quindi di identificare istantaneamente gli elementi presenti nel campione e di determinarne la concentrazione in percentuale in peso. In questo studio per osservare le fibre si è lavorato prevalentemente a 2000X, 5000X, 7000X e 10000X ingrandimenti; mentre per il conteggio solo a 10000X. È stata scelta questa risoluzione poiché la maggior parte delle fibre aveva un diametro estremamente piccolo, in media di 0,3µm. I campi di lettura sono stati realizzati in modo da esplorare la maggior parte della superficie del campione, quindi seguendo un percorso sistematico a forma di "greca" ed evitando la sovrapposizione. Le fibre che erano a cavallo dei bordi dello schermo sono state contate come 1/2 fibra.

3 Studio dei corpuscoli da amianto

I corpuscoli (asbestos bodies) sono dei concrescimenti prodotti in più stadi intorno alle fibre di amianto ad opera dei macrofagi alveolari.

Fra i criteri di Helsinki del 1997, al fine di ottenere dati utili ad integrare le storie lavorative fornite dai lavoratori, viene raccomandata l'analisi del tessuto polmonare e l'analisi di fibre e corpuscoli di amianto in esso contenuti. Secondo questi criteri vengono considerati casi rilevanti di esposizione a polvere di amianto quelli in cui si riscontrano più di 1000 corpuscoli per grammo di tessuto polmonare secco (100 corpuscoli per grammo di tessuto umido), oppure oltre un corpuscolo di amianto per millilitro di liquido derivante da lavaggio bronco-alveolare.

I dati ottenuti dall'analisi al SEM EDS evidenziano che la maggior parte delle fibre di amianto rinvenute nel parenchima polmonare appartengono al gruppo degli anfiboli contenenti Fe. Questi minerali non mostrano modificazioni composizionali, ma solo morfologiche. Tali modificazioni consistono nello sviluppo dei corpuscoli che ricoprono le fibre stesse.

I sei campioni digeriti sono stati analizzati tramite microscopia ottica per meglio identificare le caratteristiche morfologiche, le dimensioni ed il colore dei corpuscoli. L'osservazione ottica però non

ha permesso di discriminare fra corpuscoli da fibre di amianto e corpuscoli ferruginosi di altre fibre inorganiche.

Un ulteriore scopo di questo studio è stato quello di determinare la concentrazione di fibre nei tessuti contando ciascuna fibra sia ricoperta che non, usando una nuova tecnica al SEM. Dimostrare la presenza di amianto e stabilire il carico di fibre nei polmoni di persone con una neoplasia presunta da asbesto, è fondamentale perché può confermare l'esposizione pregressa, in linea con i criteri di Helsinki.

La quantificazione del numero di fibre per grammo di tessuto secco rinvenute nei campioni studiati, ha fornito concentrazioni decine di migliaia di volte superiori a quelli suggeriti dai criteri di Helsinki come valore minimo per stabilire una connessione fra esposizione lavorativa e patologia.

Una prima discriminazione delle fibre in base alle loro dimensioni è già molto importante per determinare quanto potenzialmente siano dannose. Dalle osservazioni al SEM si è potuto appurare che gran parte delle fibre che permangono nei tessuti studiati hanno lunghezze che vanno dai 5 ai 25 μm e diametri in media di 0.4 μm . Tali dimensioni sono comprese nei range stabiliti dai criteri dell'OMS, sono quindi da considerare estremamente pericolose per la loro capacità di percorrere tutto l'apparato respiratorio fino a depositarsi nelle porzioni più profonde del parenchima polmonare e in particolare negli alveoli.

Un ulteriore dato relativo alla morfologia delle fibre proveniente dall'analisi al SEM è la forma allungata e rettilinea tipica degli anfibioli d'amianto (Fig. 2). Le analisi chimiche effettuate all'EDS hanno confermato queste osservazioni fornendo composizioni in prevalenza compatibili con la specie crocidolite. In generale questi dati, uniti alle osservazioni al microscopio ottico hanno messo in evidenza l'assenza della specie crisotilo.

Figura 2. Immagine al SEM di una fibra di anfibolo di amianto rimasta inalterata. I segmenti di riferimento corrispondono a 10 μm .



Questi risultati sono in linea/accordo con recenti studi sperimentali secondo cui le fibre di amfibolo risultano essere le principali responsabili delle patologie asbesto-correlate poiché, a differenza di quelle di crisotilo, permangono nel parenchima polmonare. La spiegazione fornita in merito a ciò è che il crisotilo sia soggetto ad una dissoluzione rapida, contrariamente agli amfiboli, a causa di vari fattori tra cui:

- la perdita (leaching, ossia lisciviazione) di cationi Mg^{2+} in condizioni acide, tipiche di alcune zone del corpo umano, come dimostrato da Hume et al., 1992; da Morgan 1997 e confermato nella monografia IARC 100C del 2012

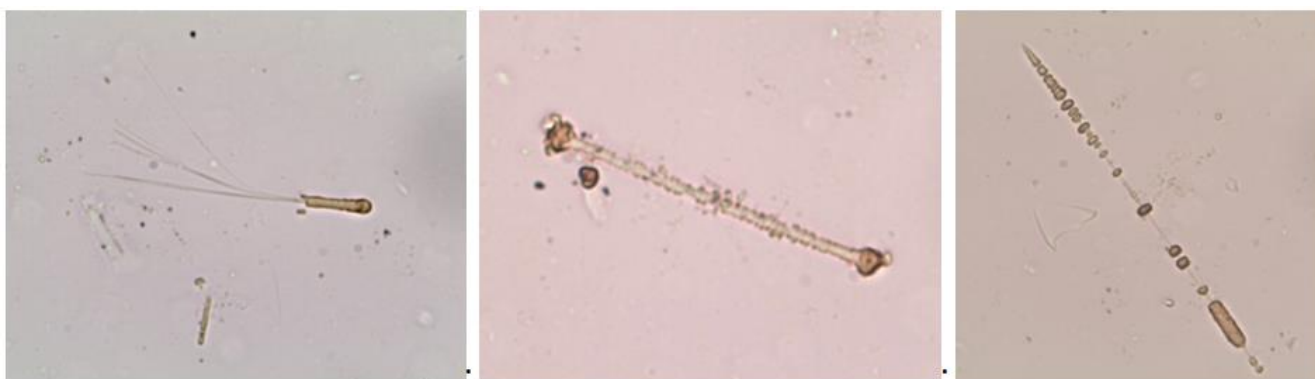
- la facile frammentazione in fibre di dimensioni ulteriormente più piccole, come sostenuto da più autori tra cui Coin et al., 1992 e tutt'oggi validato.

Questi due processi favoriscono la clearance, ossia la rimozione delle fibre dall'organismo. Tale meccanismo è influenzato sia da fattori strettamente collegati alle fibre (dimensioni, forma, composizione chimica, superficie) sia da fattori biologici che variano da individuo ad individuo. La clearance a sua volta stimola l'intervento dei macrofagi alveolari, atti alla fagocitosi di corpi estranei.

Si può quindi affermare che gli amfiboli hanno una maggiore biopersistenza rispetto al crisotilo, il quale invece presenta caratteristiche di biosolubilità, per questo è scarsamente presente nella matrice biologica polmonare.

I corpuscoli sono stati osservati prevalentemente in microscopia ottica in campo chiaro ed è emerso che presentano aspetti molto variabili (Fig.3). Essi possono formarsi solo su un estremo della fibra oppure su entrambi gli estremi, originando una forma a "manubrio"; possono coprirla nella sua interezza oppure solo in alcune parti; oppure ancora possono ricoprirla totalmente ma in modo frammentato in tante "palline" continue assumendo una forma "a collana".

Figura 3. Immagini al microscopio ottico di un corpuscolo che ricopre un solo estremo di un fascio di fibre (sinistra), corpuscolo a "manubrio" (centro) e corpuscolo con forma a "collana" (destra).



Nei pochi casi in cui è stato possibile vedere il nucleo del corpuscolo, e quindi la fibra, si è notato l'aspetto rettilineo della fibra, tipico degli amfiboli (Fig.4). Tale ipotesi è stata validata con un'analisi chimica all'EDS in cui è emerso che le fibre ricoperte hanno composizioni prevalentemente compatibili con la specie crocidolite.

Figura 4. Immagine al SEM di un corpuscolo con forma a “collana”.



È stata condotta anche un'analisi in EDS per identificare la natura dei corpuscoli. I dati ottenuti evidenziano che contengono in prevalenza ferro, ma anche fosforo e calcio.

L'elevata presenza di ferro viene confermata anche in letteratura. Uno studio recente di Pascolo et al., 2013 afferma che i corpuscoli sono formati principalmente dalla proteina ferritina, all'interno della quale il ferro è presente nello stato di ossidazione Fe^{3+} . In lavori successivi si è inoltre ipotizzato che all'interno di questa proteina avvenga un processo di bio-mineralizzazione con produzione di ferridrite. Pascolo et al. del 2015 osservano che la ferritina ha una struttura α -elica e che tramite un processo di misfolding si trasforma in β -sheet, ossia una struttura meno stabile di quella iniziale. Si presuppone che questo cambiamento sia dovuto al lungo tempo di permanenza delle fibre nell'organismo e che possa essere uno dei fattori responsabili della cancerogenicità dell'amianto.

4 Possibili sviluppi

Partendo dal presente lavoro, possibili sviluppi futuri potrebbero incentrarsi nel validare il processo di mineralizzazione della ferridrite all'interno della proteina ferritina. A causa della risoluzione spaziale richiesta per le analisi chimiche tali ricerche implicano studi molto approfonditi con strumenti di dettaglio come la μ -FTIR, che devono essere condotti presso centri di ricerca all'avanguardia come il sincrotrone.

Un ulteriore possibile sviluppo riguarda la messa a punto, almeno a livello nazionale, di procedimenti standardizzati da eseguire in maniera univoca per la preparazione di parenchima polmonare umano e l'analisi del relativo contenuto di fibre di amianto. Questo tipo di determinazioni vengono spesso applicate in merito a problematiche di carattere medico-legale volte a stabilire se un soggetto è deceduto a causa di patologie asbesto-correlate dovute ad inalazione di fibre in ambiente di lavoro. Attualmente non esistono procedure standardizzate per laboratori che effettuano tali prove, e questo porta ad una discrepanza nella lettura delle analisi.

References

1. Belluso E., Bellis D., Fornero E., Capella S., Ferraris G., Coverlizza S. Assesment of inorganic burden in biological samples by scanning electron microscopy – energy dispersive microscopy. *Microchim. Acta.* **2006**, May 15.
2. Pascolo L., Gianoncelli A., Schneider G., Salomè M., Schneider M., Calligaro C., Kiskinova M., Melato M., Rizzardi C. The interaction of asbestos and iron in lung tissue revealed by sinchrotron-based scanning X-ray microscopy . *Sci. Rep.* **2013**, 3.
3. Pascolo L., Borelli V., Canzonieri V., Gianoncelli A., Birarda G., Bedolla D.E., Salomè M., Vaccari L., Calligaro C., Cotte M., Hesse B., Luisi F., Zabucchi G., Melato M., Rizzardi C. Differential protein folding and chemical changes in lung tissues exposed to asbestoes or particulates. *Sci. Rep.* **2015**, 5.

XIX Congresso Nazionale CIRIAF

Energia e Sviluppo Sostenibile

Biomass vs coal ashes: resource or environmental issue?

P. Comodi^{1,*}, G. Cavalaglio², A. Nicolini², C. Cambi¹, M. Cecconi², F. Frondini¹, A. Zucchini¹, U. Susta¹ and F. Cotana²

¹ Dipartimento di Fisica e Geologia, Università degli Studi di Perugia

² Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Perugia

* E-Mail: paola.comodi@unipg.it

Abstract: This work is focused on the characterization of different kind of fly ashes coming from combustion of coal and different types of biomass, with the goal of understanding the differences between each other in terms of chemical and mineralogical composition, grain size and micro-structure.

A set of samples coming from gasification plants, biomass combustion (forest chips, grapevine pruning, thistles, olive-tree pruning) and coal power plants are analyzed.

The bulk analysis of samples is made by means of Energy Dispersive X-ray Spectrometry (EDS) for chemical characterization, X-Ray Powder Diffraction (XRPD) treated with Rietveld method for quantitative mineralogical characterization, and thermogravimetric measurements for determining the amount of volatile components.

Back Scattered Electrons (BSE) images of sections, integrated with further EDS point analyses, allowed to characterize the internal structure of the particles within the ashes.

Preliminary results of the analyses, which are run within the framework of a wider research project, are presented.

Keywords: Biomass; Coal; Fly ash, Chemical composition; Mineralogy, Microstructure.

1. Introduction

Circular Economy is becoming a reference model for a sustainable economic development with no exception for infrastructures and particularly for geotechnics. Recycling wastes such as ashes generated by various human activities is of paramount importance, considering the environmental impact due to their fine grain size and heavy metals contents. According to European law (UNI EN 450) unprocessed biomass ashes cannot be used in the cement industry as aggregate; on the other hand

even a third of the total amount of ashes produced by coal power plants are used as such in the cement industry.

The hazardousness may be directly dependent on the fuel that is combusted (Lima et al. 2008). Sometime fly ashes are very prone to leach metals and chlorides due to their content in soluble salts and high specific surface and so, heavy metal leachability studies are strongly recommended before the reuse of ashes in different environments.

The focus of present work is laid on the characteristics of fly ashes coming from combustion of coal and different types of biomass, to understand the differences from chemical, dimension and structural point of view. A set of samples coming from gasification plants, from biomass combustion (forest chips, grapevine pruning, thistles, olive-tree pruning) and from coal power plants are taken into account.

Preliminar results of this project will be presented

2. Materials and Methods

2.1. Samples

A set of samples of both biomass and coal derived ashes are taken into account and characterized in terms of grain size and microscopic structures.

The biomass derived samples were chosen on purpose from a wide variety of sources in order to assess as many different types of ashes as possible. This type of samples come from the Perugia (PG) area, Italy, and they are produced by burning grapevine or olive prunings, as well as by burning cardoon plants. Another sample was provided by the prototype of a gasification power plant developed by CIRIAF. A further sample consists in ashes coming from wood pellet burnt in small furnaces, which is a common method for domestic heating in Italy.

All of the coal derived ashes come from the former coal power plant of Pietrafitta (PG), nowadays out of use. Sample 3 was retrieved at the Pietrafitta as well, but actually it comes from the coal power plant of Vado Ligure (SV), Italy, since the site in Pietrafitta has been used as a landfill also for ashes produced in other power plants. The characterization of these coal derived samples is important as a basis for comparison with the biomass ashes. As already mentioned the aim of this work is to assess whether biomass ashes are as suitable as their coal derived counterpart for soil stabilization.

The samples are summarized in Table 1, along with a brief description and their origin.

Table 1. Biomass and coal derived ash samples.

Sample	Type	Origin
#1	Biomass ashes	Gasification power plant, Magione (PG) Italy
#2	Biomass ashes	Grapevine prunings, Torgiano (PG) Italy
#3	Coal ashes	Coal power plant, Vado Ligure (SV) Italy
#4	Coal ashes	Former coal powerplant, Pietrafitta (PG) Italy
#5	Coal ashes	Former coal powerplant, Pietrafitta (PG) Italy
#6	Coal ashes	Former coal powerplant, Pietrafitta (PG) Italy
#7	Biomass ashes	Wood pellet
#8	Biomass ashes	Olive tree prunings
#9	Biomass ashes	Cardoon plants

2.2. Methods

2.2.1 Bulk analyses

Pure ashes have been used for bulk characterization; the samples have been thoroughly ground and stirred with an agate mortar in order to obtain a fine and homogeneous powder.

The chemical characterization has been carried out by means of Energy Dispersive X-ray Spectrometry (EDS), using a Philips SEM 515 electron scanning microscope, at the Dipartimento di Fisica e Geologia of the Università degli Studi di Perugia. The data were obtained from several different points directly on pure powder and averaged in order to estimate the bulk chemical composition. EDS analyses were performed with an EDAX system using a ZAF semi-empirical correction.

The quantitative mineralogical characterization was performed on pure powdered samples using a Philips PW-1830 diffractometer at the Dipartimento di Fisica e Geologia of the Università degli Studi di Perugia, with Bragg Brentano geometry (θ - 2θ) and X ray tube with Cu ($\lambda = 1.540 \text{ \AA}$) and a graphite monochromator on the diffracted rays. The experiment was carried out with a step scan technique with (0.03°) 2θ steps between 5 and 80° and 20 seconds per step. The X ray tube tension was set at 40 KV with a current intensity of 30 mA. A metallic Si internal standard was added to the sample and the phase identification was performed with X'PERT HIGHSCORE PLUS (3.0.59) software. The data were treated with Rietveld method using the software GSAS (Larson & Von Dreele, 2000) in order to obtain quantitative mineralogical compositions.

Thermogravimetric measurements were performed to determine the amount of volatile components in the samples at the Dipartimento di Scienze Farmaceutiche of the Università degli Studi di Perugia, using a Netzsch STA490C thermoanalyser under a 20 mL/min air flux with a heating rate of $10^\circ\text{C}/\text{min}$.

Microprobe analysis will be performed at Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Milano, of sample homogenized to determine the average amount on major, minor and trace elements.

2.2.2 Point Analyses

In order to characterize the internal structure of the particles within the ashes, the samples have been embedded within epoxy and mounts have been obtained. The mounts have been ground and polished to a mirror finish, and sections of the microscopic particles have been obtained.

The sections within the mounts have been observed and analyzed with a high definition Field Emission SEM (FE SEM) LEO 1525 equipped with an Energy Dispersive X-ray Spectrometry (EDS) Bruker Quantax EDS for punctual analysis at the Dipartimento di Fisica e Geologia of the Università degli Studi di Perugia.

A further point chemical characterization of the sub-spherical particles are scheduled, in particular Laser Ablation ICP-MS will be carried out at the Dipartimento di Fisica e Geologia of the Università degli Studi di Perugia and Electron Probe Micro Analysis will be performed at the Dipartimento di Scienze Geologiche of the Università degli Studi di Milano. The aim of these additional punctual analysis is to study any compositional variation at a microscopic scale in order to point out the internal structures of the particles also considering trace elements.

3. Preliminary Results

3.1. Bulk Analysis

Estimate of the bulk chemical compositions were averaged from point Energy Dispersive X-ray Spectrometry (EDS) analyses (Tab.2). As it can be seen the most abundant elements in the three coal ashes analyzed are Si and Al followed by Mg and Ca, taking into account that the instrument measures only elements with atomic number larger than Oxygen.

Table 2. EDS chemical bulk compositions of the samples.

	Type	Na ₂ O (Wt%)	MgO (Wt%)	Al ₂ O ₃ (Wt%)	SiO ₂ (Wt%)	P ₂ O ₅ (Wt%)	SO ₃ (Wt%)	Cl ₂ O (Wt%)	K ₂ O (Wt%)	CaO (Wt%)	Cr ₂ O ₃ (Wt %)	MnO (Wt %)	TiO ₂ (Wt%)	FeO (Wt%)
#1	Biomass ashes			3	79	3	2	6	2	5				
#2	Biomass ashes	3	10	5	35	10		2	11	19	1	1		3
#3	Coal ashes	1	5	20	52		1		2	6			1	12
#4	Coal ashes	3	7	25	61				1	2				1
#5	Coal ashes	1	5	23	57			2	2	6				4
#6	Coal ashes	1	5	24	55				2	6			1	6
#7	Biomass ashes	2	17	4	27	5		1	3	39				2
#8	Biomass ashes	1	3	20	55	3			9	6				3
#9	Biomass ashes	18	7	1	3	3		2	26	37				3

Quantitative mineralogical analyses were performed by the Rietveld refinement of XRPD data (Tab.3). All of the samples shown have roughly 80% of amorphous phases, which cannot be characterized with this technique. The most abundant crystalline phase within the coal derived samples (#4-6) is quartz, and calcite is the mineral ubiquitously in biomass ashes.

In the coal derived sample #3 the most abundant mineral is the aluminum silicate mullite.

Table 3. Quantitative mineralogical composition of the samples.

Sample	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
Type	Biomass ashes	Biomass ashes	Coal ashes	Coal ashes	Coal ashes	Coal ashes	Biomass ashes	Biomass ashes	Biomass ashes
Quartz		X	X	X	X	X	X	X	X
Hematite				X	X	X			
Magnetite					X	X			
Rutile					X				X
Anorthite				X	X	X			

Albite				X	X	X			
Apatite		X						X	
Illite		X							
Mullite			X						
Diopside					X	X			
Calcite	X	X		X	X	X	X	X	X
Lime							X		X
Bassanite					X	X			
Gypsum				X	X	X			
Talc						X			
Pyrite							X		
Grossular							X		X
Portlandite	X								
Periclase							X		
Sylvite									X
Amorphous	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX

Examples of XRPD powder diffraction with Rietveld refinement of the spectra are reported for sample #1 and sample #3 and shown in Fig.1 and Fig. 2, respectively.

Figure 1. XRPD pattern for sample #1.

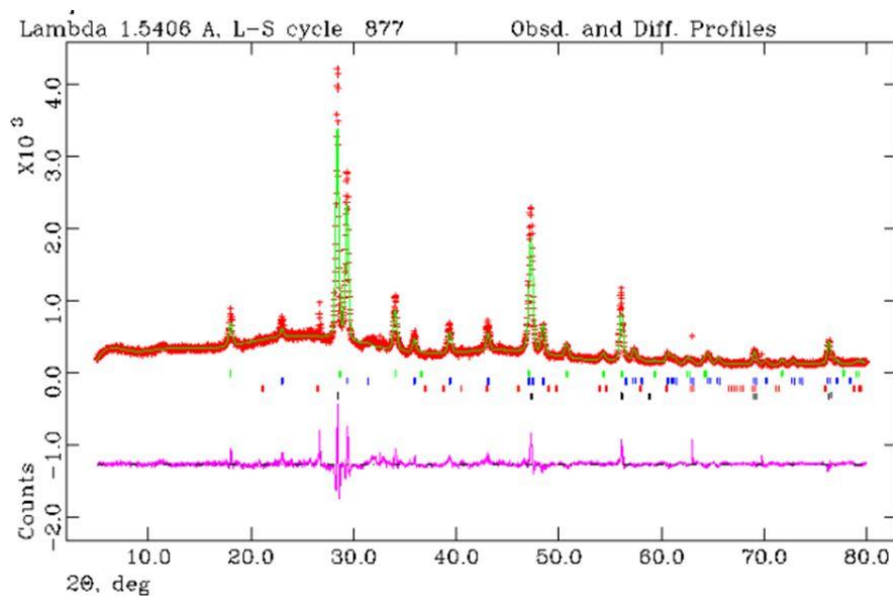
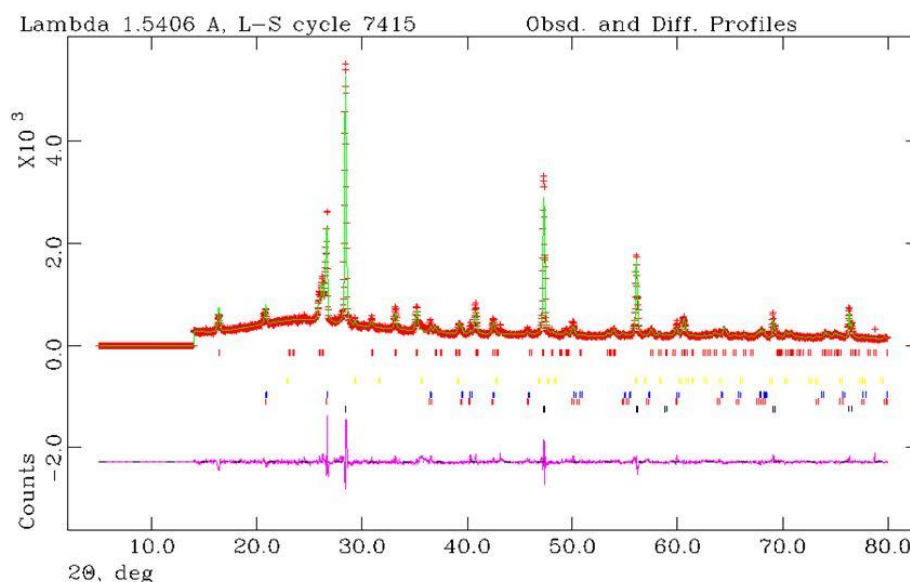


Figure 2. XRPD pattern for sample #3.

In the pattern of sample #1 the most intense peaks are due to the main crystalline phases Calcite and Portlandite. The pattern of sample #3 is characterized by the peaks of Mullite.

Red crosses represent collected data and green line the calculated profile after refinement. The line under the profiles represent the nominal angular positions for each mineralogical phases introduced in the refinements. Pink line is the difference profile, namely the difference between the calculated and measured profile.

3.2. Thermal analysis

Thermal gravimetric analyses were performed to evaluate the weight loss during heating of the sample, and to extrapolate consideration about the dihydroxylation, oxidation or other decomposition reactions.

The results are reported in figures 3a-i. The samples show different steps at different temperature which determine losses of weight of different amount.

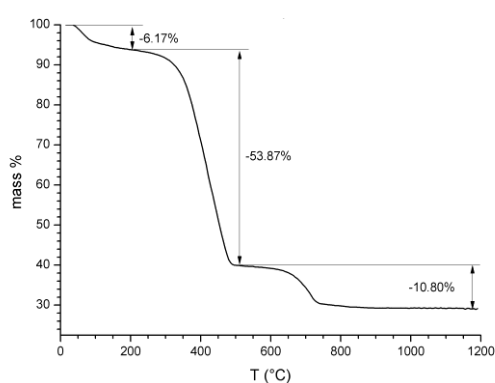
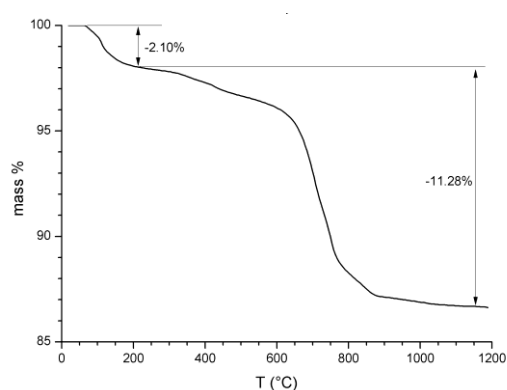
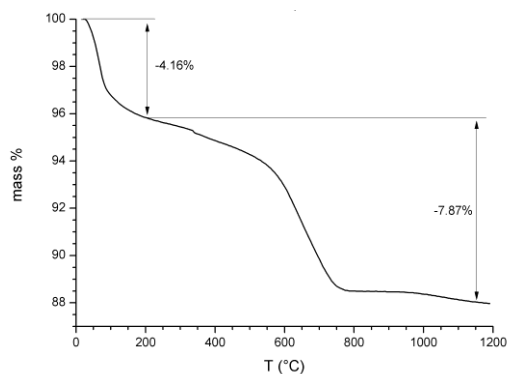
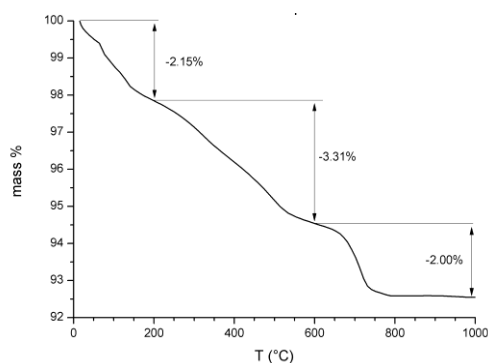
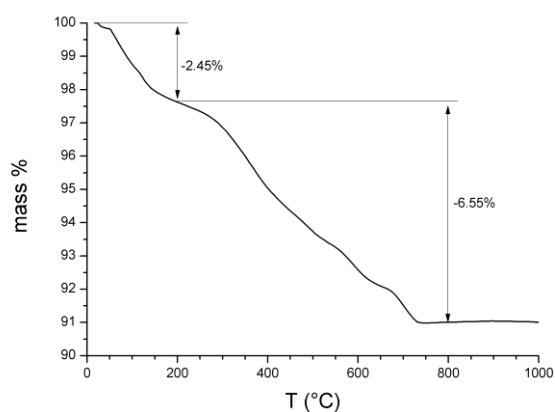
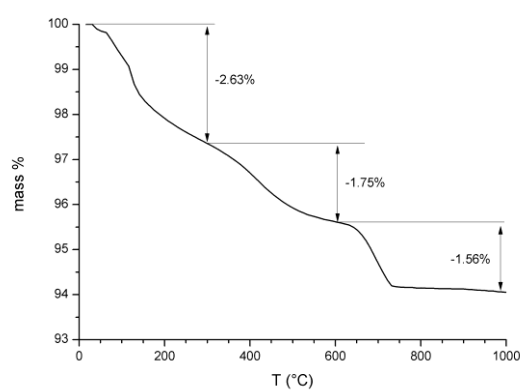
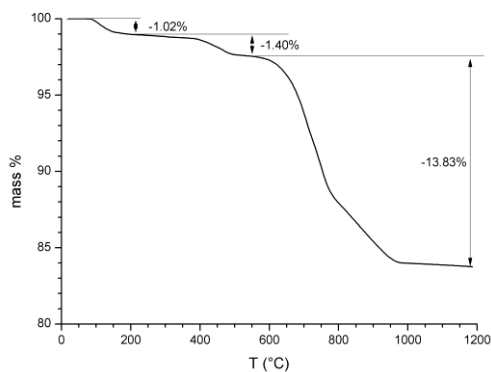
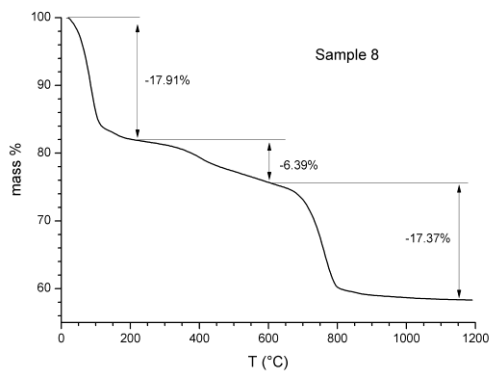
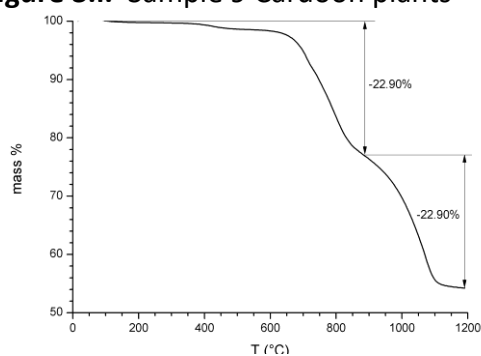
Figure 3a. Sample 1 Gasification power plant**Figure 3b.** Sample 2 Grapevine prunings

Figure 3c. Sample 3 coal ashes Vado Ligure**Figure 3d.** Sample 4 Coal Ashes Pietrafitta**Figure 3e.** Sample 5 Coal Ashes Pietrafitta**Figure 3f.** Sample 6 Coal ashes Pietrafitta**Figure 3g.** Sample 7 Wood Pellet**Figure 3h.** Sample 8 Olive tree prunings**Figure 3.i.** Sample 9 Cardoon plants

In all samples three steps are observed:

- a) the first one from room temperature to about 200° C attributable to dehydration
- b) the second one around 400°C attributable to organic material oxidation/decomposition (as supported by DTA analysis where esothermic effects are evident)
- c) the third around 700 °C likely related to the decomposition of carbonate phases (really calcite mineral is found in mineralogical analysis with X-ray diffraction).

In the different samples the amount of three components is quite different and as a consequence the weight losses are different. In the sample 9 the last step around 1000 °C should derived from decomposition of phosphate and chloride components (found from microscopic analyses).

3.3. Electron microscopic analysis

Back Scattered Electrons (BSE) images of sections from embedded coal and biomass are given in this paragraph. In BSE images the lighter the areas on a grey scale the higher the average atomic number. BSE images of coal ash sub-spherical particles and their EDS analysis are given in Figures from 4 to 6.

Figure 4. BSE image of the section of a coal ash sub-spherical particle sample3.

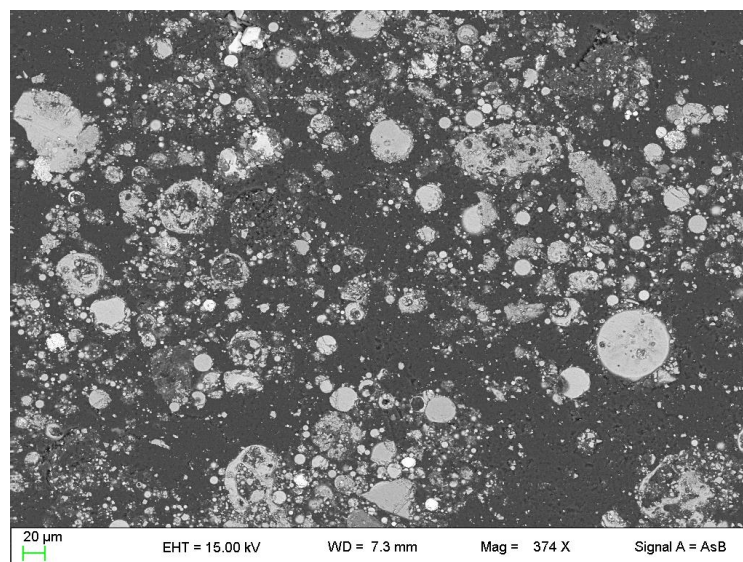


Figure 5. BSE image of the section of a coal ash sub-spherical particle sample 3 (on the left), relative EDS- analysys of sphere on the right

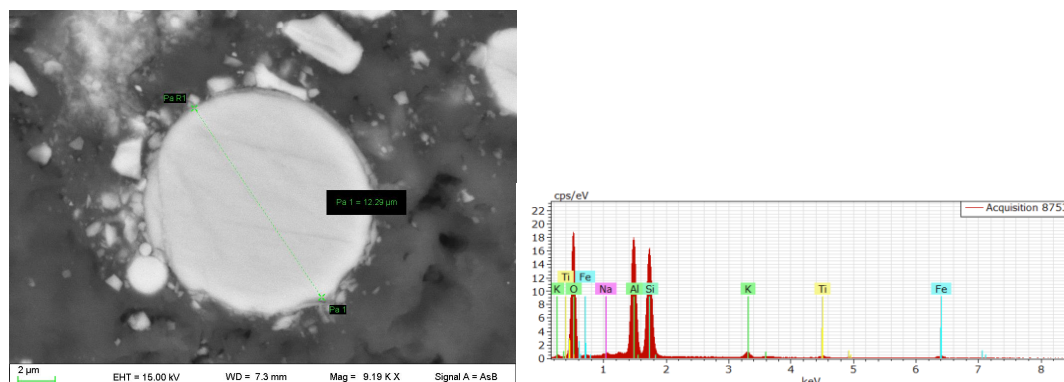
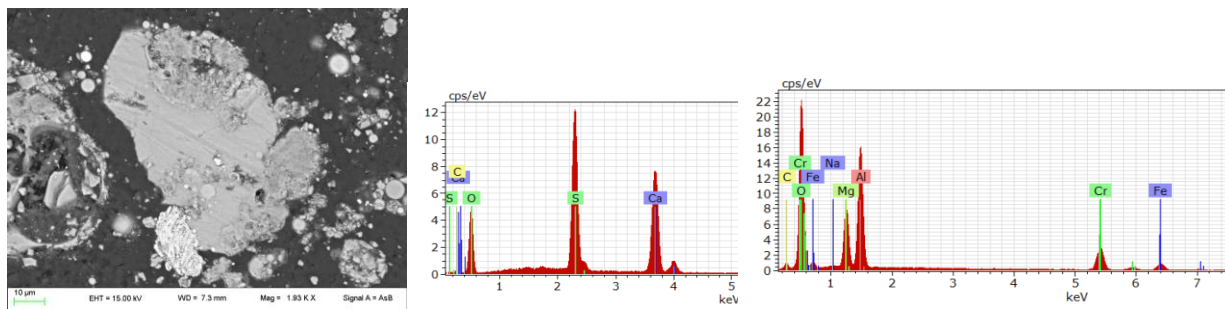


Figure 6. EDS spectra of the particles from sample 3. The bigger and darkest particle turns out to be mainly made of Ca and S (left), while the smaller and lighter particle indicated by a white arrow is made of Al, Mg, Cr and Fe (right).



BSE images collected with Field Emission SEM show the internal structure of a sections of a sub-spherical particle in biomass ashes (Figures from 7 to 15) with EDS chemical analysis.

Figure 7. BSE image of a sub-spherical microscopic particle from the gasification power plant biomass ash sample7 (left). The picture on the right shows the same particle at higher magnification, the globular-shaped subparts of the particle are shown.

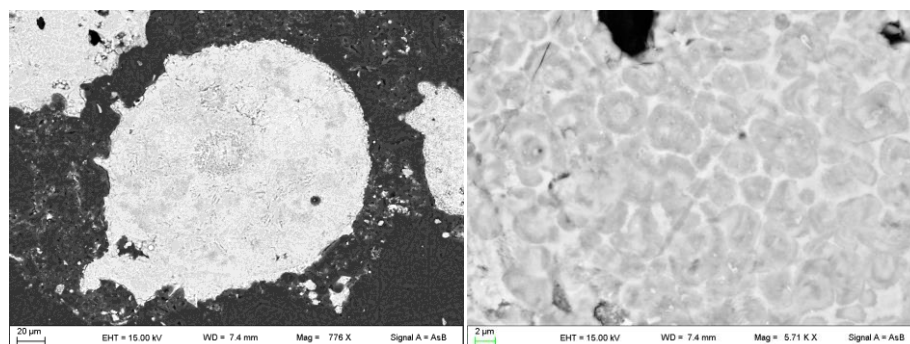


Figure 8. EDS spectra of the particle in figure 7, from sample7. The globular sub-particles turn out to be mainly made of Si and K (left), while the matrix of Si, Ca and K (right).

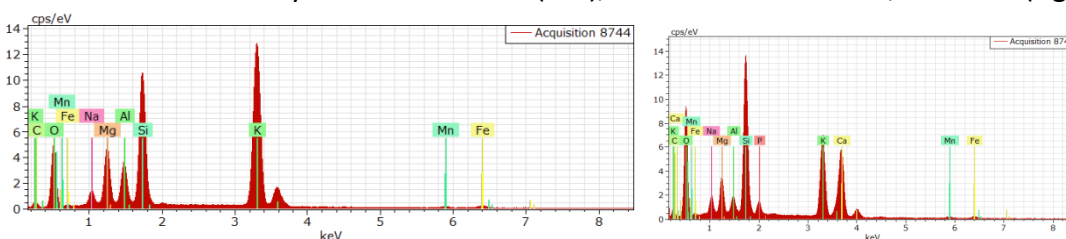


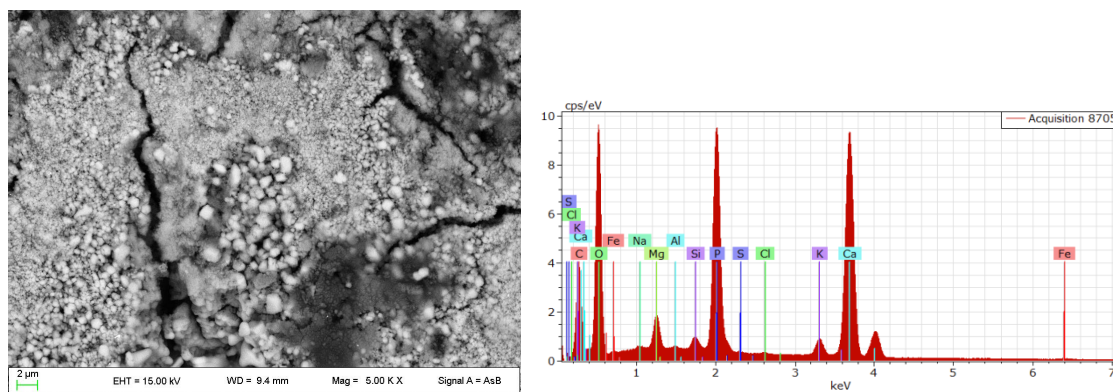
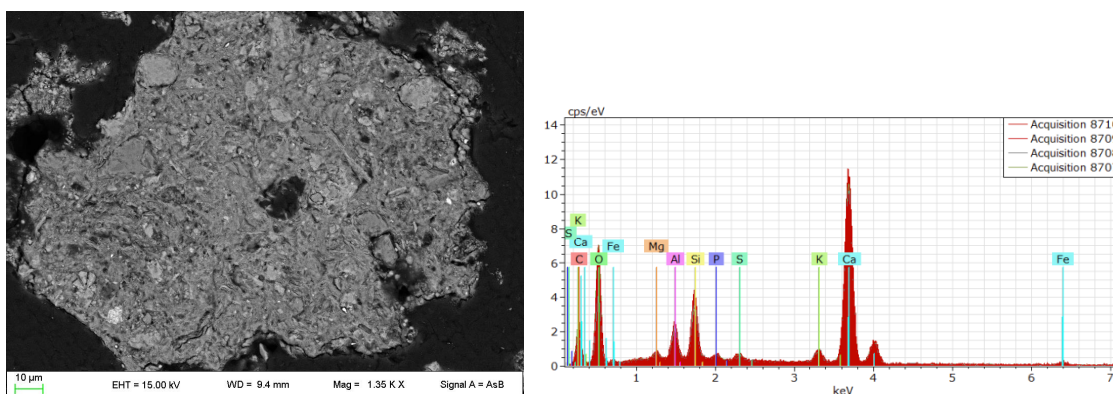
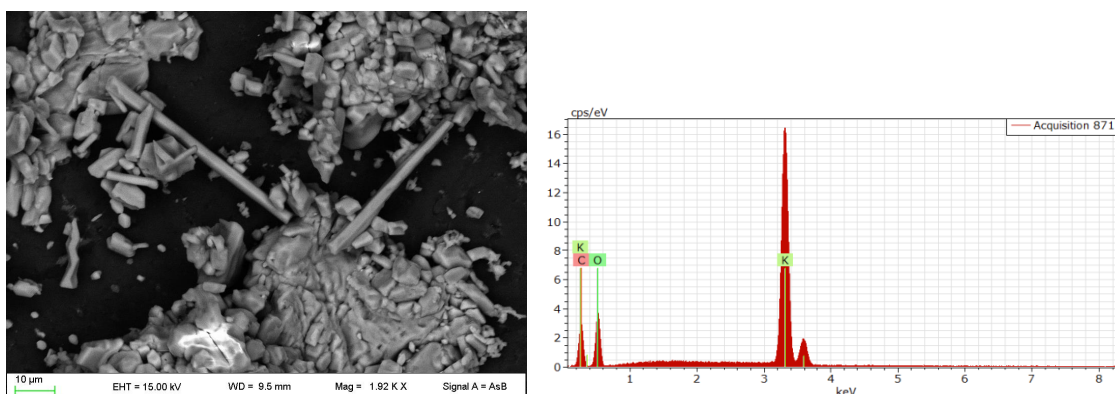
Figure 9. BSE image of microscopic apatite crystals from sample 8 with EDS analysis on the right**Figure 10.** BSE picture of a microscopic particle within sample 8 with EDS analysis**Figure 11.** Needle-shaped microscopic particles within sample 8 with EDS analysis on the right.

Figure 12. BSE picture of a microscopic particle within the cardoon plant derived ash (sample 9).

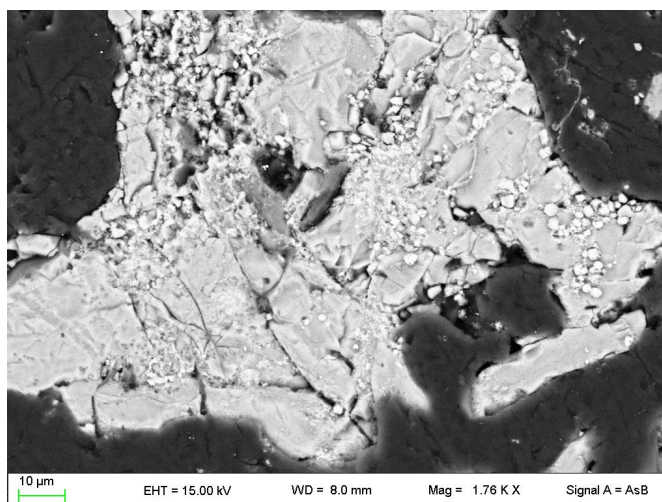


Figure 13. EDS spectra of the lightest micro crystals in Figure 12, which are made of Cl, K and Ca (left), and of the darker matrix made of K, Ca and Na (right).

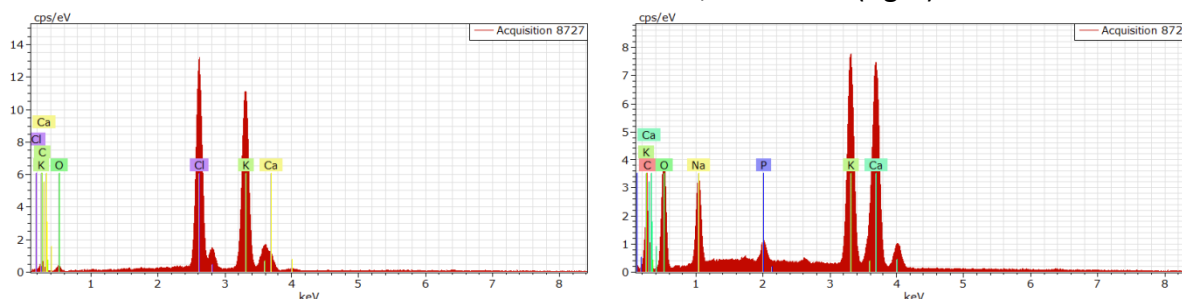


Figure 14. BSE detail of the subparts of a microscopic particle within sample 9

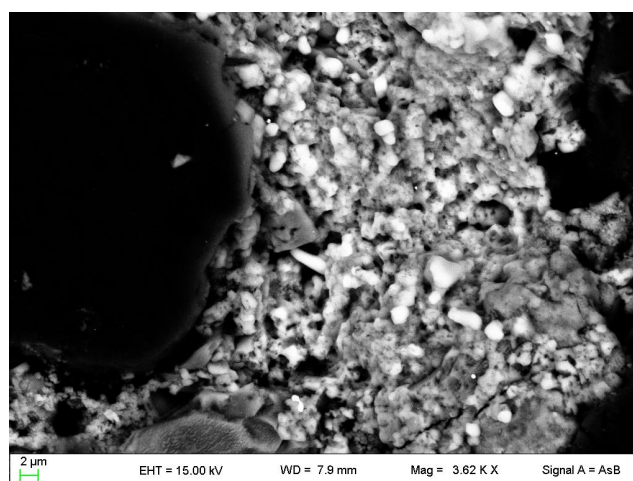
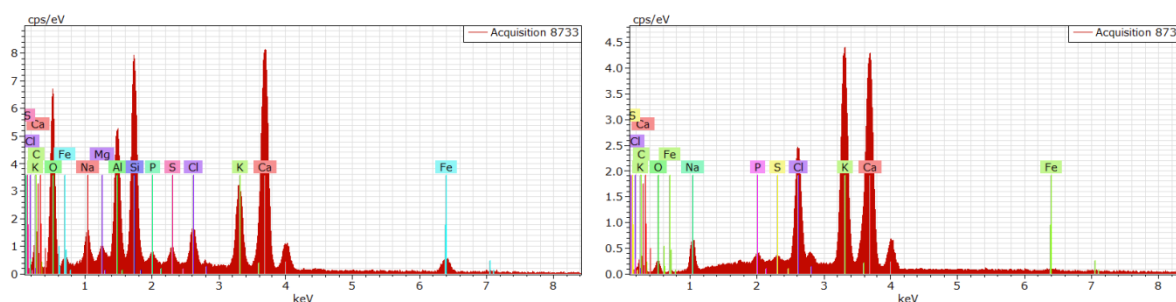


Figure 15. EDS spectra of the lightest micro crystals in Figure 14, which are made of Cl, Ca and K (right), and of the darker matrix made of Ca, Si, Al and Na (left).



4. Conclusions

The preliminary analyses of 8 samples of biomass and coal ashes show that several difference in chemical and mineralogical composition of samples can be found.

All samples from three biomass ashes present an amount of SiO_2 higher than 50%, with peaks up to 79%. Coal ashes are generally richer in Al_2O_3 than biomass ashes, while CaO is more abundant in Biomass ashes. All of the samples analyzed have roughly 80% of amorphous. The most abundant crystalline phase within the coal derived samples (#4-6) is quartz, while calcite is more abundant in the biomass ashes. In the coal derived sample #3 the most abundant mineral is the aluminum silicate mullite. Grain size and LA-ICP MS analyses, which will complete the characterization from morphological and chemical point of view of ashes coming from different sources, are in progress.

References

Larson & Von Dreele, 2000

1. Lima, A.T.; Ottosen, L.M; Pedersen A.J.; Ribeiro, A.B. Characterization of fly ashes from bio and municipal waste. *Biomass and Bioenergy* **2008**, 32, 277–282.

XIX Congresso Nazionale CIRIAF

Energia e Sviluppo Sostenibile

Couette Vortex Formation and Topology in a Duct with an Embedded Cavity: A Possible Application in Flow Structures of Natural Systems

Eugenia Rossi di Schio ^{1,*}, Cesare Biserni ¹ and Andrea Natale Impiombato ¹

¹ Department of Industrial Engineering, Alma Mater Studiorum-University of Bologna, Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna, Italy

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: eugenia.rossidischio@unibo.it

Abstract: In this paper, a numerical solution of the planar Couette flow is presented with reference to a channel with an embedded cavity which serves as promoter of vortex formation. The dimensionless governing equations (i.e. mass and momentum) have been solved computationally by employing Comsol Multiphysics, a package based on Galerkin finite element procedure. Many examples of vortex formation and topology (velocity distribution and streamlines) have been proposed, for different values of the Reynolds number and for various aspect ratios of the channel. The inversion phenomenon, with reference to the case here treated, proved to be encouraged by the particular cavity shape. Furthermore, as Re increases all the vortices move their center towards the positive y-axis direction. Finally, it is worth mentioning that the same physical model here developed can be extended to the flow structure of natural systems such as embayments subjected to parallel-to-shore currents.

Keywords: planar Couette flow; morphing cavity; vortex formation and topology; Galerkin finite element analysis.

1. Introduction

In literature, the phenomenon of vortex formation on cavities has always been widely investigated, both numerically [1–4] and experimentally [5]. Attention has been paid especially with reference to large cavities. In particular, Ref. [3] illustrates a lattice Boltzmann method used to investigate different cavity shapes and various Reynolds number values. The cavity aspect ratio was varied from 0.1 to 7 and the Reynolds number ranged from 0.01 to 5000. The effects of the above-

mentioned parameters on size, center position and number of vortices were determined together with the flow pattern in the cavity. More recently, the results of three-dimensional numerical simulations have been summarized in Ref. [6]: the Kármán vortex street inversion in the wake of a square cylinder under magnetic interaction has been studied with particular emphasis to the causes of the vortex inversion and to the physical mechanisms. The inversion phenomenon may be formed by controlling the two factors: i) the relative narrow mean flow; ii) the primary vortex with sufficient strength in the downstream.

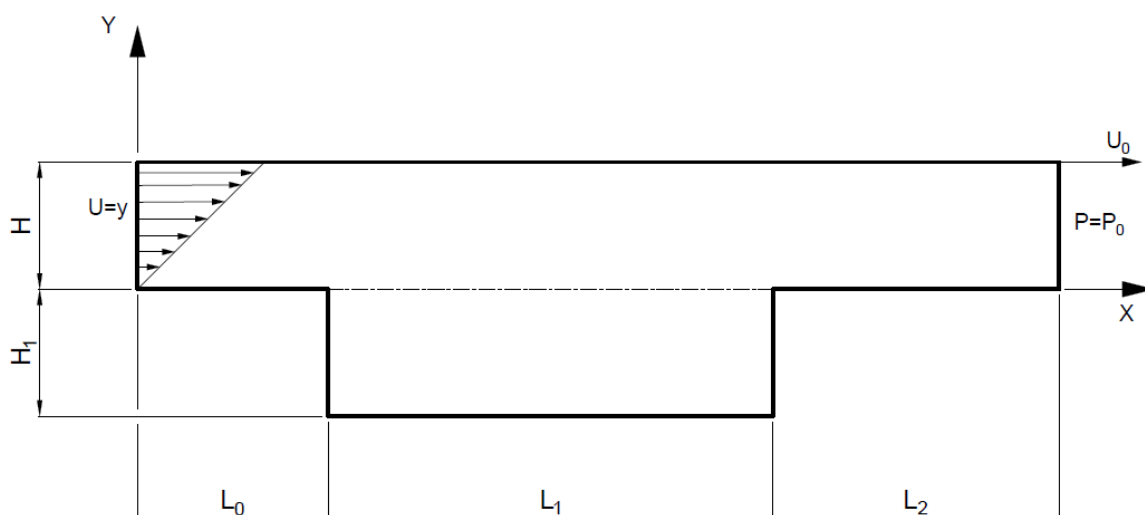
In this context, it is worth to mention that vortex formation phenomenon has many possible applications, even in environmental sciences, such as the investigation of gyres within open lacustrine embayments [7]. In literature, even the Couette flow has been widely investigated [8, 9], but in presence of cavities, the focus has been devoted especially to the stability analysis [10, 11]. The study highlighted in Ref. [12] is based on the “elemental” model of Couette flow, i.e. a viscous fluid in the space between two infinite parallel plates. Four different conditions have been contemplated: (1) constant shear stress, (2) linearly increasing shear stress, (3) constant velocity and (4) linearly increasing velocity. All the analytical solutions referred to velocity distributions under these four situations were shown. Ref. [13] deals with the longitudinal Couette flow of gas between the cylindrical surfaces of different temperatures for the free molecular and transient regimes. As far as claimed, although Couette statement does not present particular novelty, analyses on the vortex formation on cavities due to Couette flow are relatively rare in literature. In this context, the present paper is precisely aimed at the preliminary study of the vortex formation and topology, at low Reynolds numbers, for Couette flow in a place channel with an embedded cavity.

2. Problem Statement

2.1. Physical Model

The studied geometry, depicted in Figure 1, is given by the so called Couette configuration, i.e. two parallel plates, one of which (the superior) moving relative to the other with uniform velocity U_0 .

Figure 1. Physical model.



From Fig. 1, L_1 and H_1 are respectively the cavity length and height while L_0 and L_1 are the horizontal dimensions of the channel and H the channel height. Let us now consider a Newtonian fluid, with constant thermophysical properties, flowing in the channel under steady state conditions. The duct, having variable cross section, displays a cavity which serves as a vortex promoter. The flow is two-dimensional, so that the velocity vector is $\vec{U} = (U, V)$. It is driven by virtue of drag force and it is here also additionally motivated by an applied pressure gradient in the flow direction. Finally, it is worth mentioning that at the channel outlet the assigned pressure is equal to P_0 , which corresponds to $p=0$ in dimensionless term, as it will be explained in the following paragraph.

2.2. Governing Equations and Boundary Conditions

The mathematical model consists of the mass (1) and momentum (2) equations:

$$\nabla \vec{u} = 0 \quad (1)$$

$$\vec{u} \nabla \vec{u} = -\nabla p + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \vec{u} \quad (2)$$

Where the dimensionless variables are:

$$(x, y) = \frac{(X, Y)}{H} \quad (3)$$

$$(u, v) = \frac{(U, V)}{U_0} \quad (4)$$

$$p = \frac{P - P_0}{\rho U_0^2} \quad (5)$$

$$\text{Re} = \frac{U_0 H}{\nu} \quad (6)$$

The mass and momentum balance equations, respectively eq. (1) and (2), will be solved in Comsol ambient [14] together with the no slip condition (i.e. zero velocity at the fluid-solid interface), the inlet boundary condition given by the Couette velocity profile (namely $u = y$, $v = 0$) and the outlet boundary condition given by $p = 0$.

3. Results and discussion

3.1. Numerical Model and Grid Independence Procedure

The mesh has been constructed in coherence to a specific independence procedure. After having fixed the “control quantities” u_j and p_j , defined respectively as velocity and pressure referred to the j -th mesh element, the relative errors are defined as follows:

$$\Theta = \frac{|u_{j+1} - u_j|}{u_j} 100 \quad (7)$$

$$\pi = \frac{|p_{j+1} - p_j|}{p_j} 100 \quad (8)$$

Where Θ is the error referred to the velocity and π to pressure.

Therefore, by fixing the Reynolds number, many examples of grid independence achievement have been performed. Tables 1-2 refer to $Re=500$, $h_1=0,5$ and different values of l_1 (respectively $l_1 = 1,5$ and $l_1 = 5$).

Table 1. Numerical tests of grid independence ($Re=500$, $h_1=0,5$, $l_1=1,5$).

$\iint u \, d\Omega$		$\Theta \times 10^{-3}$	$\iint p \, d\Omega$	$\pi \times 10^{-2}$	NUMBER OF ELEMENTS
7,50765			0,12107		
7,51045		0,3719	0,12417	0,02557	
7,51186		0,1883	0,12533	0,9315	
7,51269	0,1104	0,12589	0,4514		
7,51321	6,951	0,12624	0,2749		
7,51340	2,528E	0,12637	0,1036		
7,51356	2,086	0,12648	8,981	53900	
7,51369	1,745	0,12658	8,005		

Table 2. Numerical tests of grid independence ($Re=500$, $h_1=0,5$, $l_1=5$).

$\iint u \, d\Omega$		$\Theta \times 10^{-3}$	$\iint p \, d\Omega$	$\pi \times 10^{-2}$	NUMBER OF ELEMENTS
7,54649			0,15883		
7,54796		0,1938	0,16284	0,02519	
7,54873		0,1030	0,16423	0,8563	
7,54921	6,304	0,16499	0,4600		
7,54952	4,101	0,16546	0,2896		
7,54963	1,522	0,16565	0,1116		
7,54973	1,270	0,16581	9,773	303800	
7,54981	1,072	0,16595	8,750		

Similarly, Tables 3-4 refer to $Re=500$, $l_1=1,5$ and different values of h_1 (respectively $h_1=2$ and $h_1=10$).

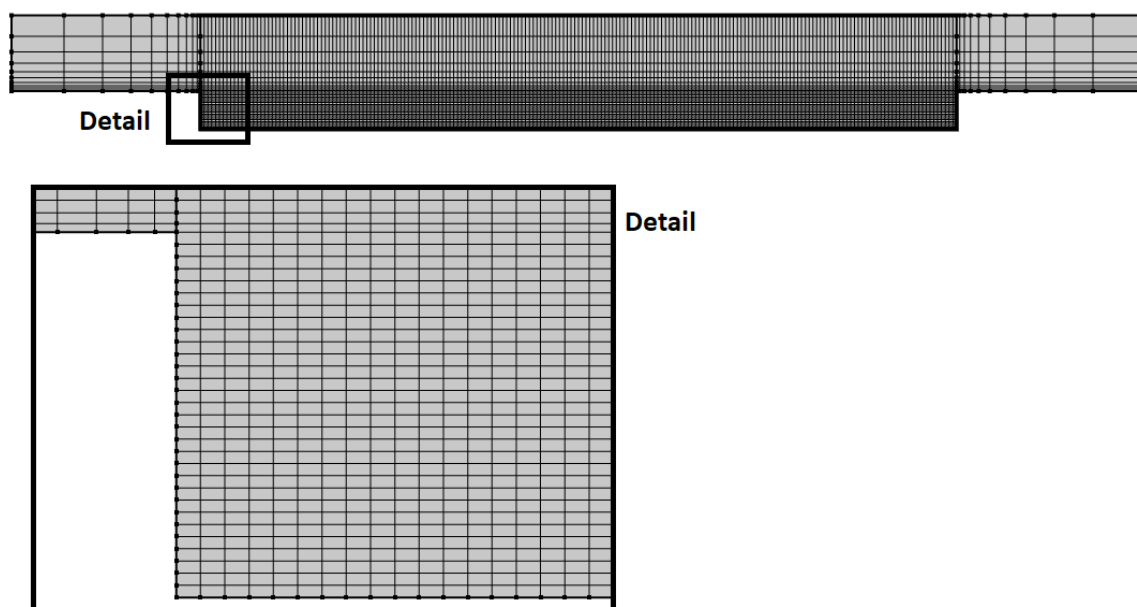
Table 3. Numerical tests of grid independence (Re=500, $l_1=0,5$, $h_1=2$).

$\iint u \, d\Omega$		$\Theta \times 10^{-3}$	$\iint p \, d\Omega$	$\Pi \times 10^{-2}$	NUMBER OF ELEMENTS
7,53696			0,14831		
7,53839		0,1896	0,15044	0,01436	
7,53879		5,386	0,15021	0,1523	
7,53898	2,423	0,14998	0,1482		
7,53907	1,317	0,14983	0,1000	140600	
7,53913	80,06	0,14973	6,799		

Table 4. Numerical tests of grid independence (Re=500, $l_1=0,5$, $h_1=10$).

$\iint u \, d\Omega$		$\Theta \times 10^{-4}$	$\iint p \, d\Omega$	$\Pi \times 10^{-2}$	NUMBER OF ELEMENTS
7,53912			0,27245		
7,53922		0,1396	0,27221	8,886	
7,53929		9,560	0,27200	7,751	
7,53934	5,650	0,27188	4,368		
7,53936	3,765	0,27178	3,686		
7,53939	2,900	0,27171	2,397		
7,53940	2,180	0,27166	1,862	562600	
7,53941	1,567	0,27162	1,501		

Finally, Figure 2 displays the mesh structure as well as a detail of the embedded cavity's corner.

Figure 2. Computational mesh.

3.2. Vortex Formation and Topology

Figures 3-6 highlight the streamlines with reference to the channel and the morphing cavity here studied. In particular, Figures 3 and 4 are referred to the cavity with variable length while Figures 5 and 6 represent the cavity having fixed length and variable height.

Figure 3. Streamlines and vortex center position for $h_1=0.5$, $l_1=1.5$.

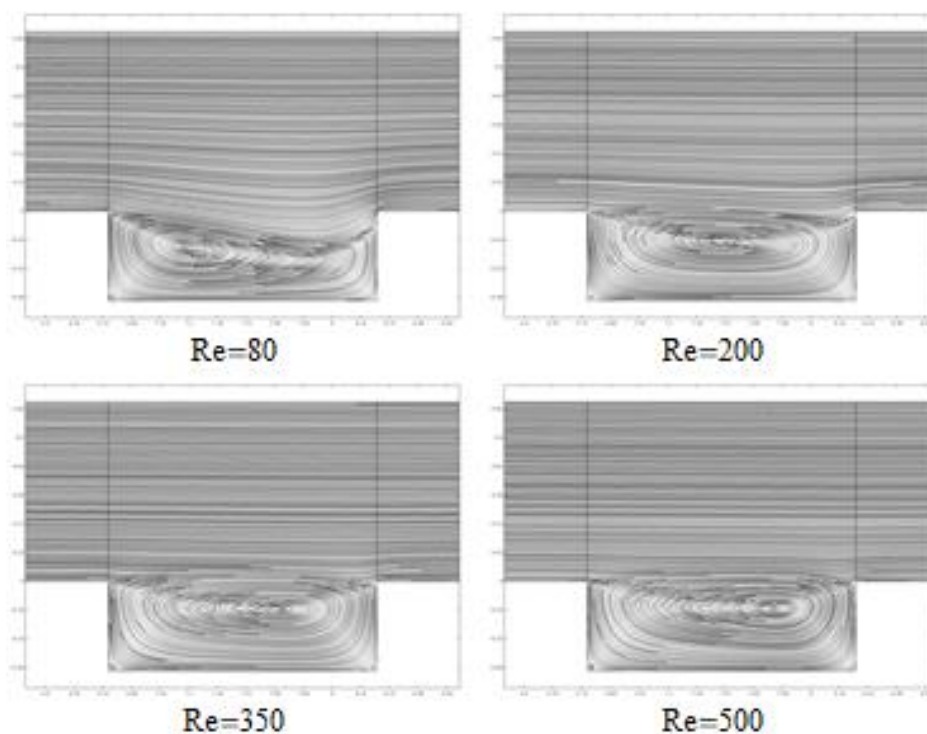


Figure 4. Streamlines and vortex center position for $h_1=0.5$, $l_1=5$.

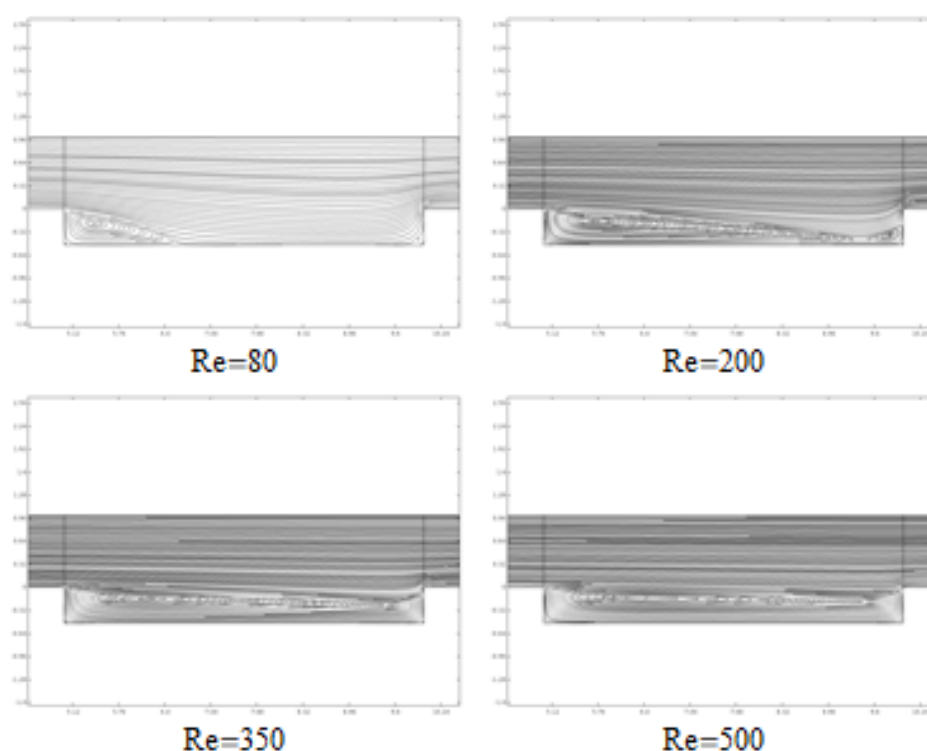
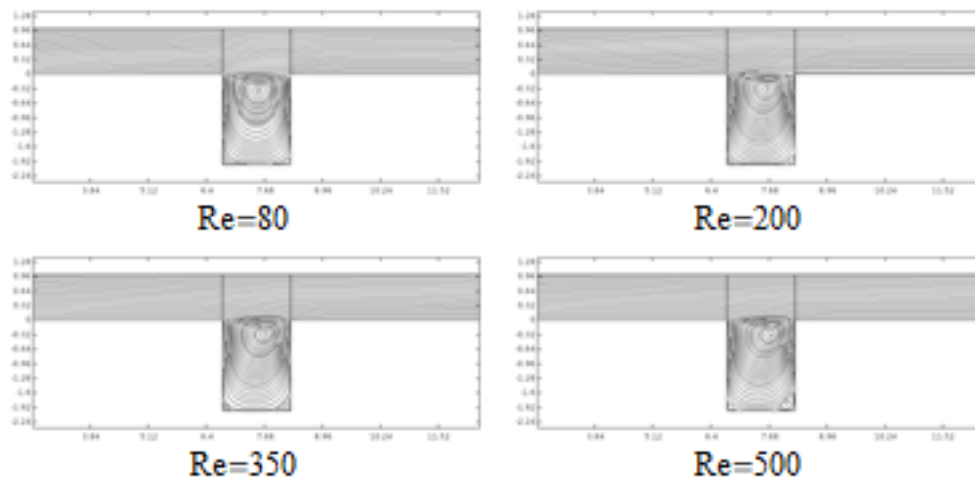
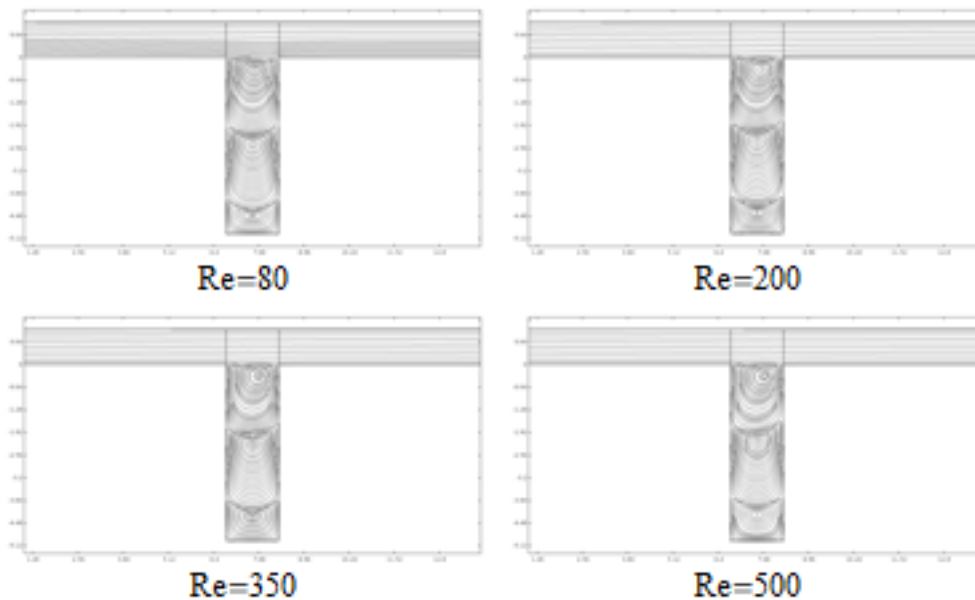


Figure 5. Streamlines and vortex center position for $l_1=0.5$, $h_1=2$.**Figure 6.** Streamlines and vortex center position for $l_1=0.5$, $h_1=5$.

Moreover Figure 3 shows that as the Reynolds number increases, a single vortex tends to move its center towards the outlet section. This observation is corroborated in Figures 7 and 8 where the position of the vortex center is highlighted versus the dimensionless coordinates. Furthermore, the vortex formation mechanism proved to be insensitive to the cavity height variation, as shown in Figures 9 and 10. Specifically, with the augmentation of the Reynolds number, the vortex positioned close to the inlet section tends to grow, moving itself towards the outlet section until it disappears by crushing with the neighbor vortex.

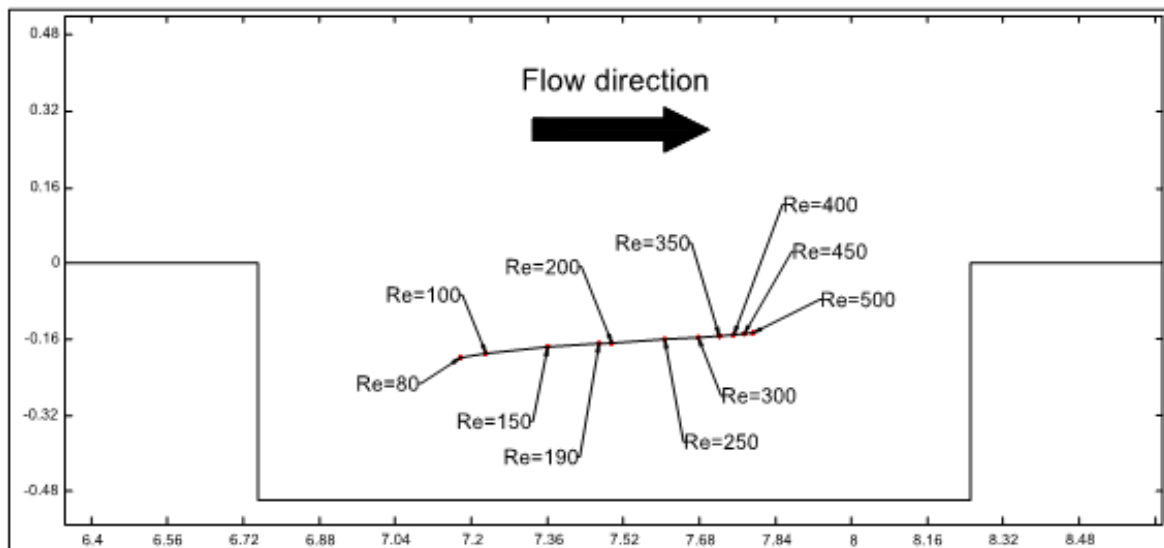
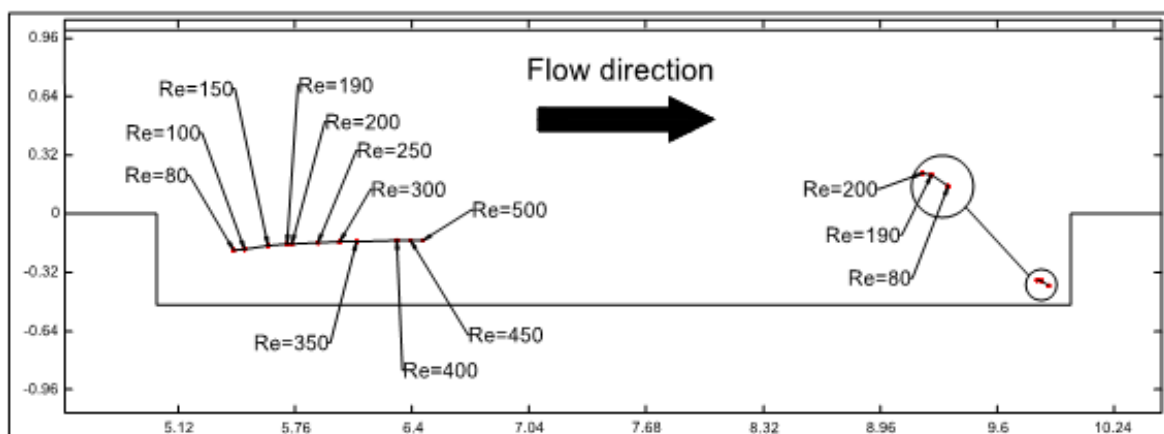
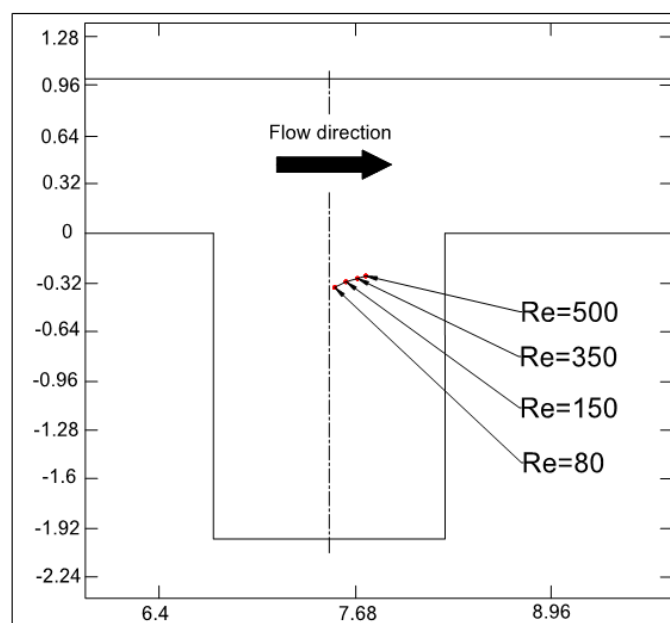
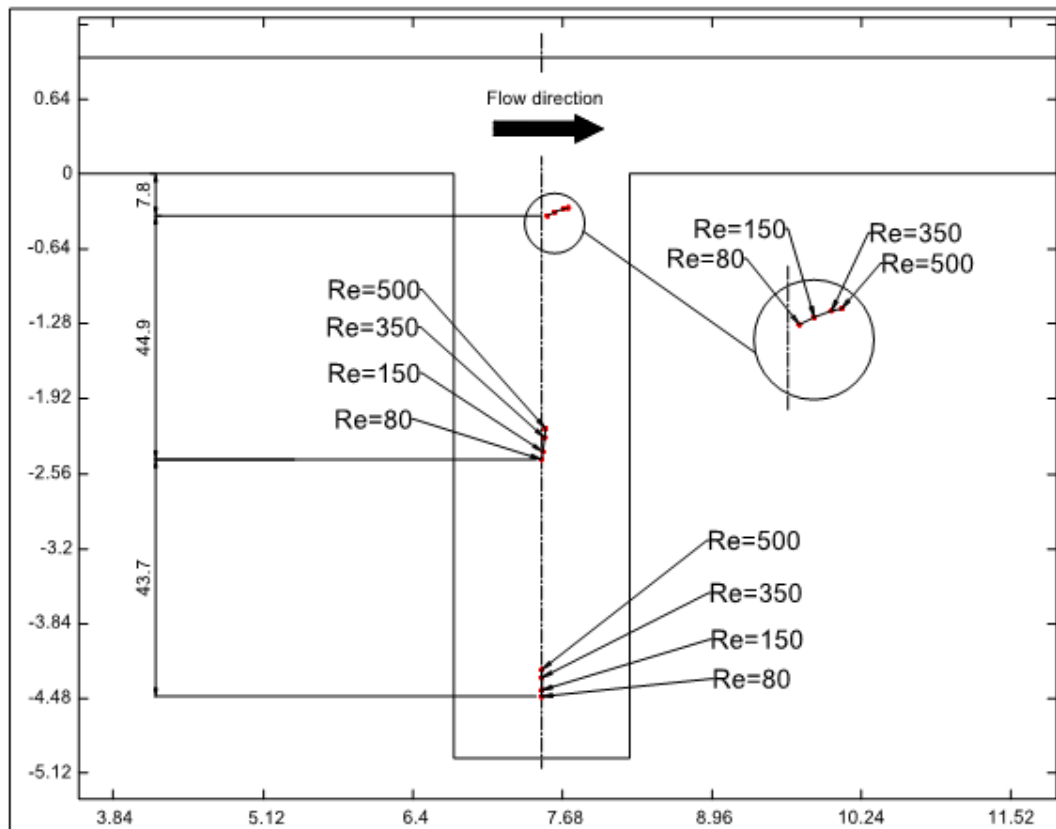
Figure 7. Position of the vortex center by varying Re , for $h_1=0,5$ and $l_1=1,5$.**Figure 8.** Position of the vortex center by varying Re , for $h_1=0,5$ and $l_1=5$.**Figure 9.** Position of the vortex center by varying Re , for $l_1=0.5$ and $h_1=2$.

Figure 10. Position of the vortex center by varying Re , for $l_1=0.5$ and $h_1=5$.

It is worth mentioning that the cavity height affects only the number of vortices, each rotating in the opposite direction of the neighbor.

4. Conclusions and future developments

This work deals with the computational investigation of the planar Couette flow applied to a channel with a morphing cavity which serves as promoter of vortex formation. The governing equations (i.e. mass and momentum) have been solved by means of Comsol Multiphysics, a package based on Galerkin finite element procedure. Many examples of vortex formation and topology (velocity distribution and streamlines) have been here proposed, for different values of the Reynolds number and for various aspect ratios of the channel. Based on pure observation, it has been demonstrated how the morphing geometry of the cavity affects (and in some cases encourages) the inversion phenomenon. Finally, many ideas have emerged in this study for future work, such as the similarities concerning flow structures of natural systems. Having said that, the physical model here developed is not dissimilar from the case study pointed out in Ref. [7], where the momentum gradient at the upstream edge proved to be the most critical factor causing vertical vorticity vectors in the shear layer between embayment flows and the offshore current.

References

1. Shen, C.; Floryan, J.M. Low Reynolds number flow over cavities. *Physics of Fluids* **1985**, 28, 3191.
2. Gustafson, K.; Halasi, K. Vortex dynamics of cavity flows. *Journal of Computational Physics* **1986**, 64, 279-319.
3. Cheng, M.; Hung, K.C. Vortex structure of steady flow in a rectangular cavity. *Computers & Fluids* **2006**, 35, 1046-1062.
4. Rosenfeld, M.; Rambod, E.; Gharib, M. Circulation and formation number of laminar vortex ring. *Journal of Fluid Mechanics* **1998**, 376, 297-318.
5. Taneda, S. Visualization of Separating Stokes Flows. *Journal of the Physical Society of Japan* **1979**, 46, 1935-1942.
6. Chen, L.; Xu, S.-J.; Ni, M.-J. The Kármán vortex street inversion and heat transfer around a square cylinder at low Reynolds and magnetic interaction numbers. *International Journal of Heat and Mass Transfer* **2018**, 117, 768–779.
7. Razmi, A.M.; Lemmin, U.; Bouffard, D.; Wüest, A.; Uittenbogaard, R.E.; Barry, D. A. Gyre formation in open and deep lacustrine embayments: the example of Lake Geneva, Switzerland. *Environmental Fluid Mechanics* **2017**, 17, 415–428.
8. Barletta, A.; Magyari, E. Buoyant Couette–Bingham flow between vertical parallel plates. *International Journal of Thermal Sciences* **2008**, 47, 811–819.
9. Abramov, A.A.; Butkovskii, A.V. The extended Reynolds analogy for the Couette problem: Similarity parameters. *International Journal of Heat and Mass Transfer* **2018**, 117, 313–318.
10. Serre, E.; Sprague, M.A.; Lueptow, R.M. Stability of Taylor–Couette flow in a finite-length cavity with radial throughflow. *Physics of Fluids* **2008**, 20, 034106.
11. Brès, G.A.; Colonius, T. Three-dimensional instabilities in compressible flow over open cavities. *Journal of Fluid Mechanics* **2008**, 599, 309-339.
12. Chen, L.; Liu, G.; Zhang, G.; Tang, Y.; Chai, J. C. Asymptotic analyses of the start-up stage of Couette flow subjected to different boundary conditions. *International Communications in Heat and Mass Transfer* **2017**, 88, 177–182.
13. Abramov, A.A.; Alexandrov, V.Yu.; Butkovskii, A.V. The longitudinal cylindrical Couette problem for rarefied gas: Energy fluxes maximums. *International Journal of Heat and Mass Transfer* **2017**, 111, 608–613.
14. COMSOL Multiphysics® v. 5.4. www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden.



CIRIAF

Via G. Duranti, 63 - 06125 - Perugia



Tel. 075.585.3717
Fax 075.585.3697



centro.ciriaf@unipg.it
www.ciriaf.it