

Abstract

The main contribution is the analysis of piezoelectric flooring, presenting the results of the work developed in the PhD in Building and Environmental Recovery (2013), as well as subsequent developments in the framework of research projects (Firb 2013), European Union initiatives (UIA 2017) and experimental projects.

The research, focusing on the technology development of the piezoelectric floorings and its possible applications, identifies three macro-systems/families (tile, carpet and device) in relation to the layers' composition of the paving technological subsystem, and proposes a critical analysis in terms of requirements, performance, and integration constraints. The results of the research, presented in the contribution, identify in the piezoelectric tile the typology with enhanced characteristics in term of requirement, performance and integration capacity; and in the people flow related to spatial dimensions, the main factor for the sustainability and the application of this technology.

Keywords: *piezoelectric flooring, innovative materials, energy efficiency, public space, integration.*

Introduction

The relationship between technological culture and design, related to the issue of energy, has an important role in the national scientific debate on the theme of reduction of energy consumption and production of energy from renewable sources. The complexity of the built environment and its relation with the natural one required a holistic and multi-disciplinary approach for the integration of renewable and innovative technologies, where the design represents the creative aspect and the technology the capacity of implementing management and operational aspects [1][2].

In this sense, technological innovation is interpreted as a tool to preserve and transmit traditional identities that characterize the space and respond to the modern requirements of security, pollution, environmental impact and resource and energy consumption [3][4][5]. The European directives underline the need to promote energy efficient solutions aimed at bioclimatic solutions respectful of the existing environment and of the specific context, focusing on a balance between required investments and energy savings considering the building life cycle [6].

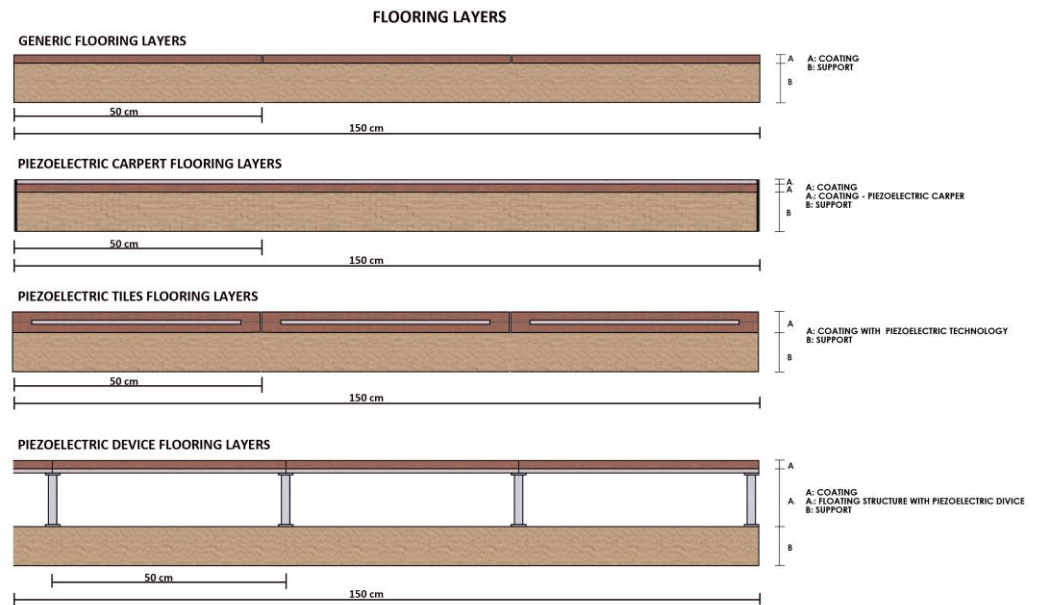


Fig. 1 - Floor system layers

Scientific research, in agreement with European trends aims at developing technological solutions able to preserve the architectural value of buildings also using innovative materials able to act not only on the production of "clean" energy or on the reduction of consumption, but also through intelligent management systems. The production, usage and diffusion of renewable technologies are now well established. In recent years there has been particular interest in the use of nanotechnologies, smart grid, smart materials¹ [7] and Internet of Things² (IoT) [8][9][10], and Energy Harvesting [11] in both experimental and scientific fields related to the construction market [12][13]. These technologies are aimed at improving energy and environmental performance of architectural contexts. In this scenario piezoceramic material can be included as smart materials as capable to change their characteristics in response to external stimuli [14][15]. The present contribution provides a synthesis of the research developed during the PhD in the Building and Environmental Recovery and of some experimental projects that analyzed energy potential and limits to the integration of piezoelectric flooring.

Piezoelectric flooring

Piezoelectric floors are innovative systems, integrated by piezoelectric materials [16] [17], that, for their physical characteristics, are able to generate an electrical charge spin-off by a

mechanical deformation (direct effect). Instead, if they are subject to an electrical charge, they could be deformed (indirect effect). The generated electrical charge can be converted into electricity through a transformer. The amount of energy obtained by piezoelectric elements deformation, albeit small, is directly proportional to the frequency of deformations [18]. This consideration has induced the scientific and experimental research at investigating the potential of integrating this technology into the floor system for exploiting the micro deformations deriving from the passage of people.

The existing piezoelectric floor offer two different application opportunities: the field of wireless sensors (using directed and undirected piezoelectric effect) and energy production (using only the directed piezoelectric effect) [19]. These products represent the consequence of the development of engineering materials that has led to the realization of increasingly performing piezoelectric ceramics, with physical characteristics, mechanical properties and energetic performances such as to consider them interesting in the field of energy or nanotechnologies for monitoring and the sensing [20].

Starting from the definition of UNI standard [21], about the flooring subsystem as an element depending by different functional layers varying in according to different types, research has shown that the functional layers

affecting the piezoelectric floor can essentially be two: the support and the coating. Considering different configurations between coating and support it is possible to identify three principal types of piezoelectric floors which are developed in the last twenty years through registered patents and experimental research. Specifically, the three type of piezoelectric floors can be identified into: carpet, tiles, devices (fig.1).

In brief the research focused on 11 patents (concerning four examples of carpets, five of tiles, and two of devices to be integrated under the finishing layer of the flooring) [22][23][24][25][26][27][28][29][30][31] and on 11 scientific experiments (three examples of carpets, four of tiles, and four of devices) which, compared, allowed to reconstruct an evolution of the different types of piezoelectric systems - both in term of temporal order and of performance and requirements - able to suggest possible scenarios of use and integration for this technology. The countries that have invested most in these researches are USA, Japan, China, UK, France, Holland and Italy.

The historical evolution conducted on the types of piezoelectric flooring highlights that from the end of the nineties until now the research has particularly intensified in the five-year period between 2006 and 2011. In this period Italy and China, more than the other countries, have invested in the research of both tiles and piezoelectric devices, and the actors who have invested in this research are mainly scientific and industrial partners (fig. 2).

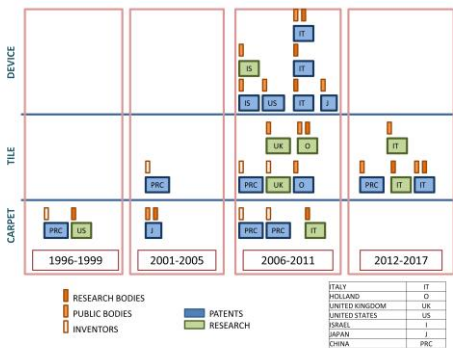


Fig. 2 - Piezoelectric flooring: technology evolution

Finally, in the last five years, research on piezoelectric floors has focused more on the implementation of tiles and Italy has provided a significant contribution to research in this field. The research pinpointed the piezoelectric floors requirements and the flooring types that best meet the requirements. Summarizing the main goal to be achieved with piezoelectric floors are: the energy production and wireless impulse generation for monitoring and security. The typology that best meets the requirements is that of the tile which returns a higher energy yield and at the same time also has a higher mechanical resistance to compression and flexion than carpets. These factors, together with the mechanical properties of the piezoceramic elements, favoured the development of this typology compared to the other two. Furthermore, the tile has been more

experimented, since, in relation to the energy requirements - whether they are energy production to power light sources or to activate wireless sensors - it has a technological integration capacity better than the others. One of the most interesting piezoelectric paving examples is Veranu, a system patented by the Luche S.r.L. (a start-up from Cagliari -Sardinia), in the 2016. This piezoelectric paving uses the kinetic energy produced by the passage of people to produce electric energy and generate information into smart environments. It is a stand-alone system not connected to the electric net, with an interesting integration capacity since it can be interfaced with floating flooring systems and other elements already existing on the building market. This feature allows to develop production at scale and exploit commercial channels already developed by existent building companies. The Veranu system can also be used as a sensor to detect information regarding the number of steps made by people that transit on the tiles, the time spent on tiles, the path followed by the people and their position. These capacities could be used to increase security in case of emergency events (e.g. fires), for monitoring access to places like banks, hospitals, schools, industries, etc. and to contribute to automation systems for the reduction of uses and consumptions.

Contest, Energy Management and flux Management.

The usage of piezoelectric flooring in a public space is conditioned by three main factors: the context, the energy management and the passage flows (Fig. 3). The flooring and the context are strictly linked and cannot be considered separately.

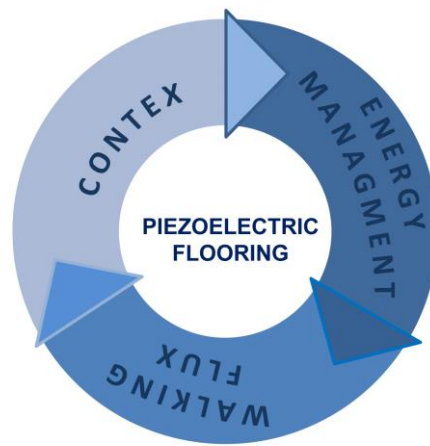


Fig. 3 - Main factors conditioning piezoelectric flooring integration

One of the main advantages of the piezoelectric technology is that it can be placed below or inside the coating. This allows for flexibility and integrability in a pre-existing architectural system. Public spaces, as shops, museums and interactive expositions for educational and cognitive development, commercial spaces, etc. represent the typologies of places often visited in daytime and less in night-time. Paradoxically these typologies also in the night-time, while they are often closed, have high energy

consumption related to light sources, and to audio emissions related to alarm systems, and to automation systems for lighting. These places have energy consumption deriving from lighting at different times of the day, both for safety and usability needs, and for aesthetic needs, as they create places full of artistic suggestions. The integration of a piezoelectric flooring in these spaces can be useful in terms of energy efficiency, to reduce energy consumption, and in term of energy production for lighting sources for artistic scenarios. It can be useful also in terms of security increasing through the activation of wireless sensors that can detect people through heat and send light or sound signals [32]. From the analysis of public spaces which could be equipped with piezoelectric flooring, the study identifies in the connecting spaces, as paths where users move from point "A" to point "B", those where technology integration is advisable. These spaces are able to contain remarkable concentration of people fluxes and, for this reason, represent appropriate places to integrate piezoelectric flooring, inasmuch energy production is directly proportional to deformation frequency - of piezoceramic elements - generetad by people passage. So, these transition places, meaning as functional diaphragms, could create a connectivity network capable of generating energy from the flux of people in movement. These places can be indentified with transition architectural elements as doors, corridors, stairs inside interfunctional hubs; they are connection spaces with clear boundaries where the crowds in movement are concentrated. This is the condition where the flux of walking people could be transformed in energy through piezoelectric floorings. These spaces are small portions of large intermodal hub, functional, commercial, touristic, cultural, and sports. These intermodal hubs [33] welcome traveller's flows, as in the case of airports, maritime ports, and train stations, subway stations, where the travel function is joint together with the more commercial one, and there are internal connection flows from the interior to the exterior and vice versa. In these spaces a large number of users concentrate during every day of the week, with some differences depending on time and day: the functional hubs like public offices, for example post office, banks, courts etc. which welcome a large number of visitors exclusively during the weekdays; the commercial hubs, like suburban shopping malls (both sectorial, like IKEA, and larger ones like outlets); the touristic and cultural hubs, like museums, connection places in historical city centres, exposition centres (like international fairs) where the fluxes are concentrated in the week-end and holydays; cultural and commercial hubs like multi-cinemas both urban and suburban; and finally sport hubs, like stadiums, gyms, dance halls, and discotheques (Fig.4).

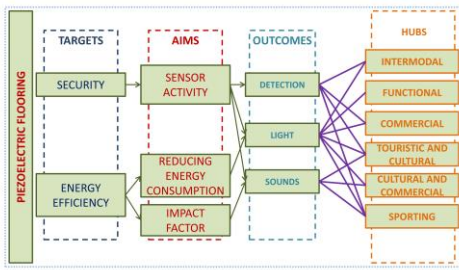


Fig. 4 - Target aims and outcomes

These crowd attractors (crowd farms)³ are characterized by walking and stopping spaces, and therefore their spatial extension couldn't be destined completely to the installation of piezoelectric floors. For example, the squares in our historical centres or even those inside the shopping malls, are characterized by remarkable spaces mostly destined to stopping more than walking. The access to these places or their internal connections, that are of smaller size and are well defined by physical boundaries, represent the space where the flow of people is more fluid and frequent. From the study conducted, comes to light that large piezoelectric surfaces require a huge initial investment cost and also a high maintenance cost, but hardly the energy production will reach the pay back of the initial investment; rather a smaller piezoelectric surface is recommended when it is possible to guarantee a constant flow of people able to induce the "sussultory" movement that generate the energy production, and the initial investment could be balanced with the benefits. For example, the gallery of the Abissi Marini, which was the subject of a proposal submitted for outfitting of a scientific museum in Naples⁴, occupies approximately 40 square meters of about 600 square meters. This space represents about the 8% of the entire exposition area. The intention to transform this space in a dark space where recreate a deep marine environment (Fig. 5) it is an overcoming combine for piezoelectric flooring. The design of this space had to account for architectural restrictions that did not allow to change architectural elements. For this reason, a floating floor was proposed, laid dry on the pre-existing floor and connected through a ramp at the beginning and at the end of the gallery. The piezoelectric floating floor that characterizes the gallery of the Abissi Marini, is used to power an illumination system made of diffusion led in the shades of blue, and also to activate sound emission systems that reproduce the sound of the sea, as it is perceived when a shell approaches an ear. The system proposed is a piezoelectric tile that, when subjected to footprints, is capable of generating electrical pulses used to power low-energy devices (led) or wirelessly activating light or sound sensors. Attendance tracking could also be of great interest in emergency situations such as the one we are experiencing with the COVID-19. The piezoelectric floor creates an evocative setting, capable to give the illusion of a progressive immersion in the depth of the

oceans and at the same time it creates an interactive educational exposition, emphasizing the concepts that are shown already along the walls of the gallery (Fig. 6). The cost of the installation in this hall for the floating piezoelectric floor with the desired features is approximately 30,000 Euros, and it corresponds to about 9% of the entire investment budgeted for the museum exhibition.

The installation proposed is sufficient to illuminate the hall in a way that favours the walking of the users, while being semi-dark and evocative. It would not be as productive to propose the same technology in other parts of the museum because it would not be economically sustainable; it would not be in the context of a defined path of users, because in larger halls the crowd is more dispersed and therefore the efficiency of the system would be reduced compared to the amount of covered surface; the produced energy would not be sufficient to power illumination systems required to cover larger areas.

Conclusions

Finally, the research shows that:

- the typology of piezoelectric tile is the one that returns a higher efficiency both in terms of energy efficiency and mechanical resistance; this typology of piezoelectric flooring is also the one that is most suitable for integration with respect to a pre-existing environments;
- the most suitable spaces to integrate piezoelectric flooring are determined by physical and environmental factors. For physical factors, it should be noted that a piezoelectric floor, in order to achieve optimal performance, must be installed along a path with a direction of travel, boundaries outlined, and with an extension of about 30/40 m² considering an average daily flow of around 1700 people a day. The accesses and paths correspond to this spatial definition. The accesses mean both gates between inside and outside and the gates inside the structures, characterized by open or opening doors with movement sensors, as well as gaps determined by the presence of automatic turnstiles or mechanics leading to a path. The pathways mean corridors, diaphragms, stairs, connectors and tunnels. The environmental factors mean a set of components that are defined by the outfitting and lighting, and are specified by the function of a given space, as in the case of the gallery of the marine abysses.

Therefore, it can be concluded that the identification of the requirements of a space that is capable of integrating piezoelectric technology are determined by the analysis of the beneficial costs of the intervention in a sustainable design perspective, evaluating the context defined by physical and environmental factors in relation to people flows.

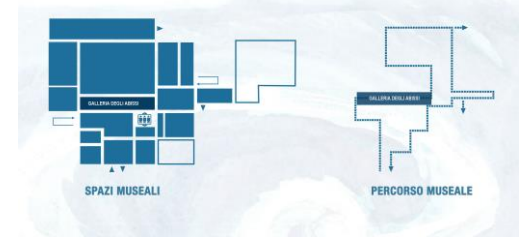


Fig. 5 - Museum path and piezoelectric path

REFERENCES

- [1] M. Losasso (2018), Progettazione Tecnologica e scenari operativi della ricerca. In O.E. Bellini, A. Ciaramella, L. Daglio, M. Gambera (a cura di), *La progettazione tecnologica e gli scenari della ricerca*, Maggioli editore.
- [2] M.T. Lucarelli, E. Mussinelli, C. Trombetta (2016) (a cura di) Cluster in Progress, la Tecnologia dell'architettura in rete per l'innovazione.
- [3] Torricelli C., 2003 *Materiali e Tecnologie dell'Architettura*, Laterza, Roma
- [4] Ciribini G., 1987, *Tecnologia e progetto. Argomenti di cultura tecnologica della progettazione*, Celid, Torino
- [5] M.A. Barucco, F. Scalisi, F. Verde (2016), *Innovazione tecnologica dei sistemi, componenti e materiali* in M.T. Lucarelli, E. Mussinelli, C. Trombetta (a cura di)
- [6] DIRETTIVA UE 2018/844 30 maggio 2018, che modifica la DIRETTIVA 2010/31/UE sulla prestazione energetica dell'edilizia e la DIRETTIVA 2012/27/UE sull'efficienza energetica.
- [7] M. Casini, *Smart materials and nanotechnology for energy retrofit of historic buildings*, International Journal of Civil and Structural Engineering- IJCSSE Volume 1: Issue 3 [ISSN 2372 - 3971], 30 September, 2014
- [8] S Mandal, "Internet of Things (part 1)," Introduction, [Online], Source: <http://www.csharpcorner.com/uploadfile/f88748/internet-of-things-iot-an-introduction/>, 2015.
- [9] Kotha Harika Devi, Mnssvkr Gupta, IOT application, a survey in International Journal of Engineering & Technology Website: www.sciencepubco.com/index.php/IJET, 7 (2.7) (2018) 891-896 18
- [10] Jacopo Iannacci, Guido Sordo, Enrico Serra, Ulrich Schmid, (2015), A Novel MEMS-Based Piezoelectric Multi-Modal Vibration Energy Harvester Concept to Power Autonomous Remote Sensing Nodes for Internet of Things (IoT) Applications, Conference paper 2015 fonte: research gate at: <https://www.researchgate.net/publication/291801884>
- [11] Amoroso F., Pecora R., Ferraro S., Lecce L.K.A., Design and testing of piezoelectric energy harvesting system from vibrations for wireless sensors, 2009, University of Naples "Federico II", Italy
- [12] Liang J. and Liao WH., 2008, On the Energy Flow in Piezoelectric Energy Harvesting with SSHI Interface, 19th International Conference on Adaptive Structures and Technologies October 6-9 2008, Ascona, Switzerland.
- [13] Yang Y. and Tang L., 2009, Equivalent Circuit Modeling of Piezoelectric Energy Harvesters, in Journal of Intelligent Material Systems and Structures, n 20
- [14] Cook-Chennault, N. Thambi and A. M. Sastry, 2008, Powering MEMS portable devices - a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems, in Smart Materials And Structure, n.17, p 9-33
- [15] Anton S. R. and Sodano H. A., 2007, A review of power harvesting using piezoelectric materials

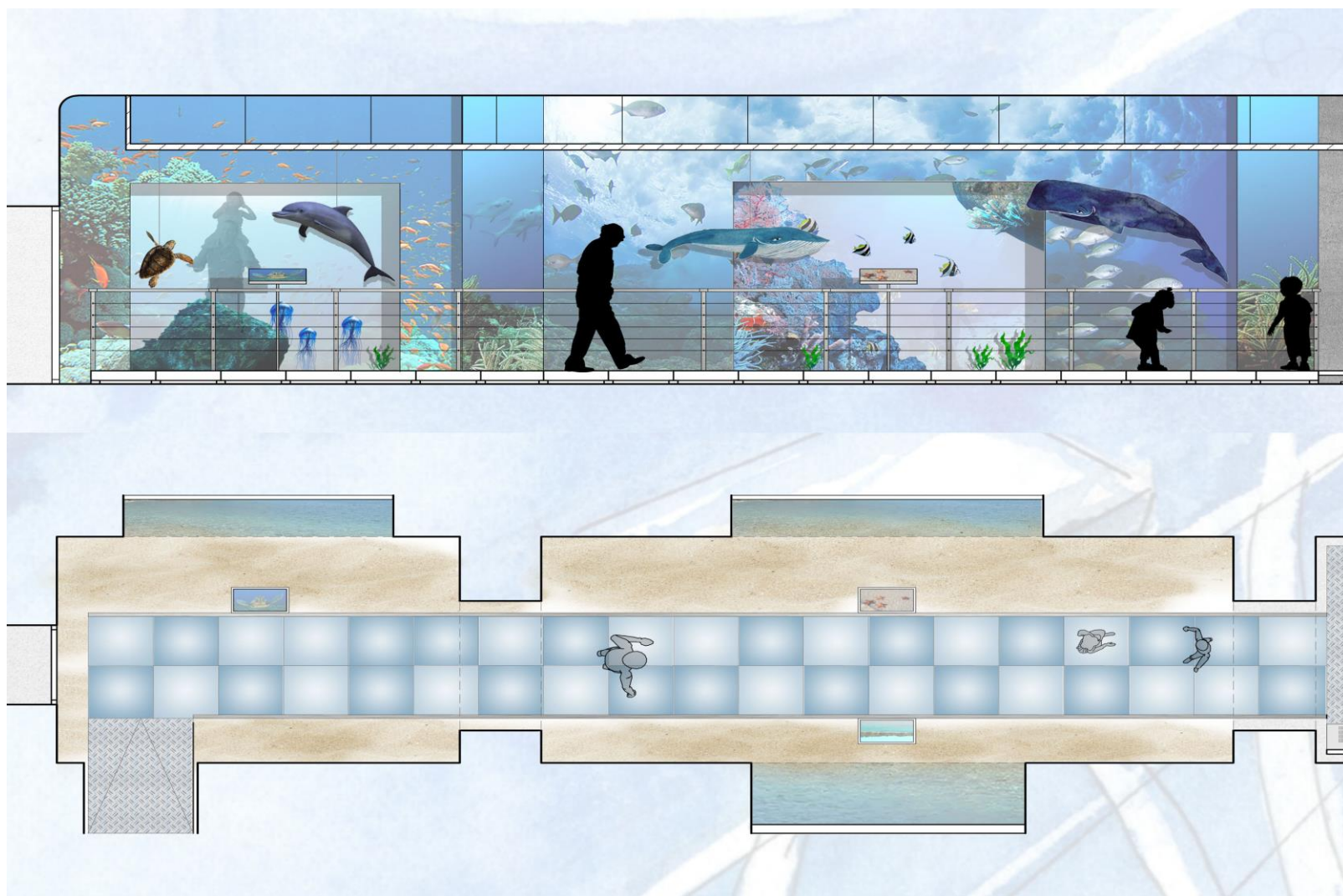


Fig. 6 - Plan and section of the piezoelectric path in the gallery of the Abissi Marini - evocative setting

(2003–2006), in *Smart Materials and Structures*, n. 16

[16] A. Licciulli, a.a. 2002-2003, *I Materiali Ceramici Piezoelettrici: Dispositivi E Applicazioni*, Corso di Scienza e Tecnologia dei Materiali Ceramici, FACOLTA' DI INGEGNERIA, Università degli Studi di Lecce

[17] P. Wierach, H. P. Monner, A. Schönecke, J. K. Dürr, 2005, *Application Specific Design of Adaptive Structures with Piezoceramic Patch Actuators*, Vienna Conference 2005

[18] S. Roundy and P. K. Wright, A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics, in *Smart Materials And Structure*, n.13, 2004, pp 1131-1142

[19] S. Roundy and P. K. Wright, A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics, in *Smart Materials And Structure*, n.13, 2004, pp 1131-1142

[20] Standard UNI 7998:1979, Edilizia, Pavimentazioni, Terminologia

[21] PATENT US2011291526, Stati Uniti, 1.12.2011 - Piezoelectric stack compression generator

[22] PATENT CN 201878378, Cina, 22.06.2011 - Wireless stage light control system based on piezoelectric polymeric

[23] PATENT CN201590775, Cina, 22.09.2010 Piezoelectricity generator applied to steps in front of building

[24] PATENT WO2010116348, Israele, 14.10.2010 - Modular piezoelectric generators

[25] PATENT GB2462643, Gran Bretagna, 17. 02. 2010 - Piezoelectric pressure-sensitive tiles for surveillance and monitoring of large areas

[26] PATENT CN101334148, Cina, 31-12-2008 - Induced light emitting ground tile

[27] PATENT CN2567287, Cina, 20-08-2003 (Y) - Floor tile with piezoelectric ceramic flat for luminous by external force

[28] PATENT JP2002250532, Giappone, 06.09.2002 - Electric Carpet

[29] PATENT US006257293, Stati Uniti, 10 Luglio2001, Thunder Actuators, Face International Corporation,

[30] PATENT CN2375954, Cina, 26. 04. 2000 - Piezoelectric sensor for burglar alarm

[31] PATENT . US2008/0252174A1, US Mahammadi F., Cass R.B., 2008, Energy harvesting from multiple piezoelectric sources,

[32] D. Benasciutta, E. Brusaa, L. Moroa, S. Zelenikaa, 2008, Ottimizzazione di dispositivi piezoelettrici per accumulo di energia, in XXXVII Convegno Nazionale, 10-13 settembre 2008, Università di Roma "LA SAPIENZA

[33] Schiaffonati F., (2016) *Il Territorio delle infrastrutture*, in *Technè* n.112016, Infrastrutture, pag. 12-21

NOTES

1. The innovative materials are the result of the design, characterization, production and application of structures, devices and systems controlled at the nanoscale. M.A. Barucco, F. Scalisi, F. Verde, *Innovazione tecnologica dei sistemi, componenti e materiali.*
2. Internet of Thinking: A network of physical objects or 'things' that can interact with each other to share information and take action." or: "The Internet of Things (IoT) is the interconnection of uniquely identifiable embedded computing devices within the existing Internet infrastructure S Mandal, "Internet of Things".

3. Crowd Farm is a definition used by student design of MIT Boston in 2007 to describe piezoelectric paving https://en.wikipedia.org/wiki/Crowd_Farm
4. Outfitting Design of architects group: arch. M.C. Vigo Majello, arch. P. Cislighi, arch. A. Cerbasi, arch. B.M. Rodriguez (2018)

PAVIMENTI PIEZOELETTICI E SPAZI PUBBLICI

Abstract

Il contributo analizza il tema delle pavimentazioni piezoelettriche, presentando i risultati del lavoro sviluppato nel dottorato di ricerca in Recupero Edilizio ed Ambientale (2013), e i successivi approfondimenti elaborati per la partecipazione a progetti di ricerca (Firb 2013), iniziative dell'Unione Europea (UIA 2017) e sperimentazioni progettuali. La ricerca, cercando di costruire un quadro di sviluppo della tecnologia e delle sue applicazioni, analizza i pavimenti piezoelettrici, individuando tre macro sistemi-famiglie (mattonelle, tappeti e dispositivi) in base agli strati che compongono il sottosistema tecnologico delle pavimentazioni, e ne propone una lettura critica in termini di requisiti, prestazioni e vincoli all'integrazione. Il contributo presenta i risultati della ricerca, analizzati attraverso una sperimentazione proettuale, individuando nel flusso di passaggio delle persone il fattore determinante per la sussistenza dell'impiego di questa tecnologia in relazione alla sua capacità d'integrazione nel contesto.

Parole chiave: pavimenti piezoelettrici, materiali innovativi, efficientemente energetico, spazi pubblici, integrazione.

Introduzione

Il rapporto tra cultura tecnologica e progetto rispetto

alla questione energetica assume nel dibattito scientifico nazionale un ruolo rilevante nell'ambito delle tematiche che affrontano la riduzione dei consumi energetici e la produzione di energia da fonti rinnovabili. La complessità dell'ambiente costruito e le relazioni tra questo e l'ambiente naturale richiedono un approccio olistico e multidisciplinare per l'integrazione di tecnologie rinnovabili e innovative, in cui la progettazione rappresenta l'apporto creativo e la tecnologia la capacità di mettere a sistema gli aspetti produttivi, gestionali ed operativi [1][2]. In tal senso si interpreta l'innovazione tecnologica come strumento per conservare e tramandare identità e caratteri tradizionali, che connotano lo spazio, e rispondere alle istanze moderne di sicurezza, inquinamento, impatto ambientale e consumo di risorse e di energia [3][4][5]. Gli orientamenti delle direttive europee sottolineano la necessità di promuovere soluzioni di energy efficiency volti alla promozione di soluzioni bioclimatiche, rispettose dell'esistente e delle specificità del contesto nel quale si inseriscono, puntando a un equilibrio ottimale in funzione dei costi tra gli investimenti necessari e i risparmi energetici realizzati nel ciclo di vita di un edificio [6]. La ricerca scientifica, in accordo con le tendenze europee, mira a sviluppare soluzioni tecnologiche capaci di preservare il valore architettonico degli edifici, facendo riferimento anche a materiali innovativi capaci di agire non solo sulla produzione di energia "pulita" o sulla riduzione dei consumi, ma anche attraverso sistemi di gestione intelligenti. Consolidate, ormai, la produzione, l'uso e la diffusione delle tecnologie rinnovabili, si registra, infatti, negli ultimi anni, prima nell'ambito delle sperimentazioni e poi nell'ambito del dibattito scientifico e del mercato delle costruzioni, un particolare interesse per l'uso di nanotecnologie, smart grid, smart materials [7], sistemi di Internet of Thinking (IoT) [8][9][10] e Energy Harvesting [11] per contribuire al miglioramento delle performance energetico - ambientali complessive di un contesto architettonico. In questo scenario si possono inserire i materiali piezoceramici, intesi come smart materials in quanto capaci di variare le proprie caratteristiche in risposta a determinati stimoli esterni [12][13]. Il contributo presentato espone una sintesi della ricerca sviluppata prima nell'ambito del dottorato di ricerca in Recupero Edilizio ed Ambientale e dopo con alcune sperimentazioni progettuali, che analizza le potenzialità energetiche ed i limiti all'integrazione delle pavimentazioni piezoelettriche.

Pavimentazioni piezoelettriche

Le pavimentazioni piezoelettriche sono dei sistemi innovativi che integrano materiali piezoceramici [16] [17], che, per le loro caratteristiche fisiche, a seguito di una deformazione meccanica sono capaci di generare una carica elettrica (effetto piezoelettrico diretto) o viceversa se sottoposti a una carica elettrica possono deformarsi (effetto piezoelettrico indiretto). La carica generata, attraverso dei trasformatori, può essere convertita in energia elettrica. La quantità di energia ottenuta dalla deformazione degli elementi piezoelettrici, seppur di piccola entità, è direttamente proporzionale alla frequenza delle deformazioni [18]. Da circa vent'anni la ricerca scientifica e sperimentale sta indagando sulle potenzialità di integrare questa tecnologia nel sistema delle pavimentazioni per sfruttare le microdeformazioni derivanti dal passaggio delle persone, in particolare su sistemi posati a secco. I pavimenti piezoelettrici finora prodotti, ancora in via sperimentale, offrono due opportunità: da una parte sono impiegati nella sensoristica wireless (sfruttando sia l'effetto piezoelettrico diretto che quello indiretto, semplicemente attraverso gli impulsi derivati), dall'altra sono impiegati per la produzione di energia (sfruttando l'effetto piezoelettrico diretto e convertendo la carica generata in energia elettrica) [19]. Questo tendenza è supportata dallo sviluppo dell'ingegneria dei materiali che ha portato alla realizzazione di ceramiche piezoelettriche sempre più performanti, con caratteristiche fisiche, proprietà meccaniche e prestazioni energetiche tali da considerarle interessanti nel campo dell'energia o delle nano tecnologie per il monitoraggio e la sensoristica

[20].

Partendo dalla definizione della norma UNI [21], in riferimento al sottosistema pavimentazione come elemento costituito da diversi strati funzionali che variano a seconda delle diverse tipologie, la ricerca ha evidenziato che gli strati funzionali che interessano il pavimento piezoelettrico possono essere essenzialmente due: il rivestimento ed il supporto. Lo studio, in base agli strati funzionali di rivestimento e supporto, ha individuato tre tipologie di sistemi di pavimentazione piezoelettrica, sviluppate negli ultimi venti anni attraverso brevetti depositati e ricerche sperimentali.

Nello specifico si evidenzia che a seconda della variazione dello strato di rivestimento e di supporto è possibile classificare le pavimentazioni piezoelettriche in: tappeti, mattonelle, dispositivi (figura 1).

Nel corso della ricerca si sono analizzati 11 brevetti [22][23][24][25][26][27][28][29][30][31][32] (riguardanti quattro esempi di tappeti, cinque di mattonelle, e due di dispositivi da integrare sotto lo strato di finitura della pavimentazione) e 11 sperimentazioni scientifiche (tre esempi di tappeti, quattro di mattonelle, e quattro di dispositivi) che messi a confronto, hanno permesso di ricostruire un'evoluzione delle diverse tipologie di sistemi piezoelettrici - sia di ordine temporale che di prestazioni e requisiti - che suggerisce possibili scenari di uso ed integrabilità della tecnologia. I paesi che hanno maggiormente investito in queste ricerche sono USA, Giappone, Cina, Gran Bretagna, Francia, Olanda e Italia.

L'evoluzione storica condotta sulle tipologie di pavimentazioni piezoelettriche, mette in evidenza che dalla fine degli anni novanta ad oggi la ricerca si è particolarmente intensificata nel quinquennio tra il 2006 ed il 2011. In questo quinquennio l'Italia e la Cina, più degli altri paesi, hanno investito nella ricerca sia di mattonelle che di dispositivi piezoelettrici, e gli attori che hanno investito in questa ricerca sono principalmente riconducibili a partners scientifici ed industriali (figura 2).

Nell'ultimo quinquennio infine, la ricerca si è maggiormente concentrata sull'implementazione della mattonella e l'Italia, ha fornito un apporto significativo alla ricerca in questo campo.

Da questa analisi si evincono da una parte le finalità che si vogliono raggiungere con i pavimenti piezoelettrici e dall'altra la tipologia di pavimento che meglio risponde ai requisiti richiesti. In particolare si può sintetizzare che le principali finalità che si vogliono raggiungere con le pavimentazioni piezoelettriche sono: A) la capacità di produrre energia, B) l'opportunità di inviare segnali wireless per sistemi di monitoraggio e sicurezza. La tipologia che risponde meglio ai requisiti richiesti è quella della mattonella che restituisce un rendimento energetico superiore e contemporaneamente ha anche una resistenza meccanica a compressione e a flessione maggiore rispetto ai tappeti. Queste fattori unitamente alle proprietà meccaniche degli elementi piezoceramici, ha favorito lo sviluppo di questa tipologia rispetto alle altre due. Inoltre si evidenzia che la tipologia della mattonella è stata maggiormente sperimentata, in quanto, in relazione ai requisiti energetici richiesti - siano essi di produzione di energia per alimentare sorgenti luminose o per attivare sensori wireless - sembra quella che raggiunga una capacità d'integrazione tecnologica e nel contesto migliore rispetto alle altre.

Uno degli esempi più interessanti è quello di Veranu, un sistema brevettato e sperimentato da una start-up sarda, di Cagliari nel 2016, la Luche S.r.l. Questo pavimento sfrutta l'energia cinetica prodotta dal passaggio delle persone per produrre energia elettrica o generare informazioni e rendere un ambiente intelligente. È un sistema ad isola, non connesso con la rete, con una capacità d'integrazione interessante dal momento che può essere anche inserito con sistemi di pavimenti flottanti ed elementi di finitura già esistenti sul mercato. Questa caratteristica permette di disporre di una produzione in scala della struttura e di impiegare canali commerciali già presenti tra le aziende che producono pavimentazioni tradizionali.

Il sistema Veranu oltre a produrre energia può essere impiegato come sensore allo scopo di recepire informazioni in merito al numero di passi; al tempo di permanenza; al percorso dei pedoni; alla posizione delle persone. Queste capacità possono essere impiegate per aumentare la sicurezza in caso di eventi straordinari (es. incendi), per il controllo degli accessi dei luoghi come banche, ospedali, scuole, industrie, etc., e infine per contribuire ai sistemi di domotica per la riduzione degli usi e dei consumi.

Contesto, gestione energetica, gestione dei flussi

Nella determinazione dell'assetto formale e funzionale di una pavimentazione piezoelettrica, per uno spazio di fruizione collettiva si deve considerare che l'uso delle pavimentazioni piezoelettriche è condizionato da tre fattori determinanti: il contesto, la gestione energetica e la gestione dei flussi di percorrenza (fig.03).

La pavimentazione ed il contesto rappresentano un insieme difficilmente scindibile. Dallo studio condotto si evince che, uno dei vantaggi della tecnologia piezoelettrica è che può essere disposta al disotto o all'interno del rivestimento. Questo permette una grande flessibilità di applicazione e di integrabilità, nel rispetto anche di un sistema architettonico preesistente, dei suoi valori e nei limiti che ne derivano.

Gli spazi di fruizione collettiva come negozi, sale museali, esposizioni interattive per lo sviluppo educativo e cognitivo, spazi pubblicitari etc., rappresentano una categoria di spazi molto frequentati nelle ore diurne e poco in quelle notturne, con grandi consumi di energia legata sia alle sorgenti luminose, ma anche alle emissioni sonore, ai sistemi di allarme, e ai sistemi di domotica per l'illuminazione. Questi luoghi tra l'altro hanno dei consumi energetici derivanti dall'illuminazione nelle diverse ore della giornata sia per esigenze di sicurezza e fruibilità ma anche per esigenze di carattere estetico in quanto creano luoghi carichi di suggestioni artistiche.

L'integrazione in un pavimento piezoelettrico, può determinare in questi spazi un vantaggio sia in termini di efficientamento energetico per la riduzione dei consumi e la produzione di energia per alimentare sistemi di illuminazione suggestiva e/o ambientali sonore; sia in termini di incremento della sicurezza sfruttando l'attivazione di sensori wireless che possano rilevare le presenze attraverso il calore e inviare segnali luminosi e/o sonori [33]. Il rilevamento delle presenze potrebbe essere di grande interesse anche in situazioni di emergenza come quella che stiamo vivendo con il COVID-19.

Dall'analisi degli spazi di fruizione collettiva che possono dotarsi di pavimentazioni piezoelettriche e da queste trarne un vantaggio in termini di efficientamento energetico e di sicurezza, la ricerca individua negli spazi di collegamento, ovvero quei luoghi dove gli utenti si spostano da un punto "A" a un punto "B" e nei diaframmi di collegamento, gli accessi, i contesti in cui è auspicabile l'integrazione della tecnologia. Questi spazi presentano un'elevata concentrazione di flussi di persone in movimento e rappresentano per questo i luoghi più idonei per una proposta di percorso piezoelettrico, in quanto la produzione di energia è direttamente proporzionale alla frequenza delle deformazioni degli elementi piezoceramici. Questi luoghi di transizione, diaframmi funzionali, possono definire una rete connettiva in grado di generare energia dal flusso delle persone in movimento. Questi luoghi possono essere riconosciuti nei varchi, nei corridoi, nelle scale all'interno di luoghi capaci di attrarre le folle³; sono spazi di connessione con limiti definiti dove si concentrano numeri elevati di fruitori in movimento (folle), in cui il flusso di pedate può essere trasformato in energia attraverso le pavimentazioni piezoelettriche. Questi spazi sono piccole porzioni di grandi attrattori intermodali, funzionali, commerciali, turistici, culturali, commerciali e sportivi.

Gli attrattori intermodali [34] accolgono flussi dei viaggiatori, come nel caso degli aeroporti, delle stazioni marittime e ferroviarie, le stazioni metropolitane, dove alla funzione del viaggio è unita quella commerciale, e si verificano dei flussi di connessione interna, dall'esterno verso l'interno e

viceversa, dove si concentrano un numero elevato di fruitori durante tutti i giorni della settimana con le dovute differenze nelle diverse fasce orarie; gli attrattori funzionali come gli uffici pubblici ad esempio: uffici postali, agenzia delle entrate, tribunali etc., che accolgono un gran numero di frequentatori esclusivamente durante i giorni feriali; gli attrattori commerciali come gli shopping-malls extraurbani (da quelli settoriali come IKEA a quelli più ampi come gli outlet); gli attrattori turistici e culturali come i musei, i luoghi di connessione nei centri storici o tra monumenti, i complessi espositivi (come la fiera internazionale); gli attrattori culturali e commerciali come le sale multicinema sia urbane che extraurbane; ed infine gli attrattori sportivi come gli stadi, le palestre, le sale da ballo o le stesse discoteche (fig. 04). Questi attrattori di folle (crowd farm) sono caratterizzati da spazi di passaggio e spazi di permanenza, e per questo non tutta la loro dimensione spaziale può essere destinata all'installazione dei pavimenti piezoelettrici. Ad esempio, le piazze dei nostri centri storici o anche quelle interne agli shopping malls, hanno caratteristiche dimensionali ampie ma hanno una vocazione alla sosta più che a luogo di percorrenza. Gli accessi a questi luoghi o le loro connessioni interne, invece che hanno dimensioni ridotte, ben definite da confini fisici, sono quelli dove il flusso delle persone è fluido e frequente. Dallo studio condotto durante la ricerca, si vince che non è necessario avere delle grosse superfici di piezoelettrico per le quali si prevede un costo d'investimento iniziale molto elevato ed anche un altrettanto costo di manutenzione. Sono invece consigliate piccole aree ben definite di superficie piezoelettrica, dove è possibile garantire la frequenza costante del passaggio delle persone per simulare il movimento "sussultorio" che favorisce la produzione di energia. A titolo di esempio, si descrive di seguito la galleria degli Abissi Marini, oggetto di una proposta presentata al concorso di idee per l'allestimento di un museo scientifico⁴. La galleria occupa circa 40 mq di circa 600 mq che rappresentano la superficie dell'intero percorso espositivo, quindi rappresenta circa l'8% dell'intera superficie espositiva (fig. 05). È uno spazio buio e stretto nel quale si vuole ricreare un ambiente marino profondo. Il progetto di questo spazio ha dovuto tenere conto che ci trovavamo in un ambito di edificio vincolato, quindi non è possibile cambiare gli

elementi di finitura o alterare lo spazio architettonico. In questo senso si è pensato a un pavimento flottante, posato a secco sul pavimento esistente e raccordato ad esso tramite una rampa all'inizio ed alla fine della galleria. Il pavimento flottante piezoelettrico, che caratterizza la galleria degli abissi marini, alimenta un sistema di illuminazione soffuso a led nelle tonalità del blu, e attiva dei sistemi di emissione sonora che riproducono il rumore del mare così come si percepisce quando si avvicina una conchiglia ad un orecchio. Il sistema proposto è una mattonella contenente materiale piezoelettrico che, sottoposto al calpestio, è capace di generare impulsi elettrici impiegati per alimentare dispositivi a bassa potenza (led) o come sistema di attivazione wireless per sensori luminosi o suoni. Il pavimento piezoelettrico crea un'ambientazione suggestiva, capace di restituire la sensazione di immersione progressiva negli abissi marini, e al tempo stesso creare un'esposizione didattica interattiva evidenziando i contenuti che sono esposti lungo le pareti della galleria (Fig.06). Il costo dell'installazione, in questa sala, del pavimento flottante piezoelettrico, con le caratteristiche richieste si aggira intorno ai 30.000,00 euro, che corrisponde a circa il 9% dell'intero investimento messo a bando per l'allestimento del museo. L'installazione così pensata dovrebbe essere sufficiente a illuminare la galleria degli abissi per favorire il percorso agevole dei fruitori, in una condizione di luci soffuse ed interazioni sonora. In questo senso l'installazione contribuisce a ridurre i consumi energetici, e a ricreare un'ambientazione suggestiva. Non sarebbe altrettanto produttivo disporre questa soluzione tecnologica in altre parti del museo in quanto: non sarebbe economicamente sostenibile; non si avrebbe un percorso definito di fruitori in quanto nelle sale più grandi la folla si disperde, e quindi non si otterrebbe un rendimento proporzionalmente maggiore rispetto alla superficie coperta; l'energia prodotta non riuscirebbe ad alimentare sistemi di illuminazione volti a coprire superfici più grandi.

Conclusioni
In conclusione dalla ricerca condotta si evidenzia che: - la tipologia di mattonella piezoelettrica è quella che restituisce un rendimento più elevato sia in termini di efficienza energetica che di resistenza meccanica; questa tipologia di pavimentazione piezoelettrica è

anche quella che maggiormente si presta all'integrazione rispetto ad un ambiente preesistente; - gli spazi più indicati ad integrare pavimenti piezoelettrici sono determinati da fattori fisici ed ambientali. Per fattori fisici si evidenzia che un pavimento piezoelettrico, per raggiungere delle prestazioni ottimali deve essere installato lungo un percorso con un senso di marcia, confini delineati, e con un'estensione di circa 30/40 mq considerando un flusso medio giornaliero di circa di 1700 persone al giorno. A questa definizione spaziale corrispondono gli accessi e i percorsi, dove per accessi si intendono sia i varchi tra interno ed esterno che i varchi interni alle strutture, caratterizzati da porte aperte o apribili con una sensoristica di movimento, nonché i varchi determinati dalla presenza di tornelli automatici o meccanici che conducono verso un percorso. Per percorsi si intendono i corridoi, diaframmi di collegamento, scale, connettori e gallerie. Per fattori ambientali si intendono un insieme di componenti che sono definite dall'allestimento e dall'illuminazione, e sono specificate dalla funzione di un determinato spazio, come nel caso della galleria degli abissi marini. Pertanto si può concludere che l'individuazione dei requisiti di uno spazio che sia capace di integrare la tecnologia piezoelettrica sono determinati dall'analisi dei costi benefici dell'intervento in un'ottica di progettazione sostenibile, valutando il contesto definito da fattori fisici ed ambientali in relazione ai flussi di percorrenza.

NOTES

1. I materiali innovativi sono frutto di progettazione, caratterizzazione, produzione e applicazione di strutture, dispositivi e sistemi controllati alla scala nanometrica. M.A. Barucco, F. Scalisi, F. Verde, Innovazione tecnologica dei sistemi, componenti e materiali op.cit., pag. 104
2. Internet of Thinking: una rete di oggetti fisici o "cose" che possono interagire tra loro per condividere informazioni e agire". oppure: "L'Internet of Things (IoT) è l'interconnessione di dispositivi informatici incorporati identificabili in modo univoco all'interno dell'infrastruttura Internet esistente.
3. Crowd Farm progetto degli studenti del MIT di Boston del 2007 https://en.wikipedia.org/wiki/Crowd_Farm
4. Progetto di allestimento presentato con gruppo RTP costituito da arch. M.C. Vigo Majello, arch. P. Cislighi, arch. A. Cerbasi, arch. B.M. Rodriguez