

Maurizio Piazza*, Mariapaola Riggio*
Roberto Tomasi*, Albino Angeli**

Operational stages and criteria in the rehabilitation of timber floors in the Belasi Castle (Trentino, Italy)

Etapy działania i kryteria w odnawianiu podłóg drewnianych w Pałacu Belasi (Trydent we Włoszech)

1. Introduction

The conservation of timber structures has improved in recent years with a growing appreciation of their historical significance. In order to provide guidance on interventions on timber structures of historical and cultural interest, *ad hoc* international and national technical committees, such as the ICOMOS IWC (International Wood Committee), the RILEM TC 215 AST (*In situ* assessment of timber), the Italian UNI-NORMAL WG 20 (Cultural Heritage-Wood and wooden materials), have been constituted.

The principle and criteria for the protection and preservation of historic structures defined at international level, and the standards on historic timber structures established by the Italian Standardisation body (UNI), have represented the doctrinal and normative framework, within which the restoration of the timber floors of the Belasi Castle (14th century), in Trentino, has been carried out.

In particular, the refurbishment of a simple board timber floor in the north-east wing of the Castle, by means of wood-wood composite structure assembled with inclined screw connectors, is described in this paper. The authors report and reference the decision procedures involved in both the investigation of the structure and the choice of the applied remedial measures.

1. Wstęp

Konserwacja konstrukcji drewnianych rozwinęła się w ostatnich latach, gdy wzrosła świadomość historycznego znaczenia tych konstrukcji. Aby przygotować wskazówki dotyczące interwencji w konstrukcje drewniane istotne pod względem historycznym i kulturowym, założono międzynarodowe i krajowe techniczne komitety *ad hoc*, takie jak ICOMOS IWC (Międzynarodowy Komitet ds. Drewna), RILEM TC 215 AST (ocena stanu drewna na miejscu), włoska UNI-NORMAL WG 20 (Dziedzictwo Kulturowe – drewno i materiały drewniane).

Zasady i kryteria ochrony i konserwacji historycznych konstrukcji zdefiniowane na poziomie międzynarodowym oraz normy dotyczące historycznych konstrukcji drewnianych opracowane przez włoski urząd ds. standaryzacji (UNI) stanowią ramy formalne i normatywne, w których mieściła się konserwacja drewnianych podłóg w zamku Belasi (XIV w.), w Trydencie.

Artykuł opisuje przede wszystkim renowację prostej podłogi z desek drewnianych w północno-wschodnim skrzydle zamku za pomocą złożonej konstrukcji z drewna łączonego z drewnem ukośnymi łącznikami gwintowanymi. Autorzy opisują i oceniają procesy decyzyjne na etapie badania konstrukcji i wyboru zastosowanych środków naprawczych.

Criteria enunciated in the “Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage”, developed by the ICOMOS ISCARSAH committee (International Committee on Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage) [1], have been considered.

The rehabilitation process has been articulated, according to the UNI standard 11138:2004 [2], as follows:

- preventative evaluation of the state of the artefact,
- intervention planning,
- intervention execution,
- control of the efficiency of the intervention.

2. The timber floors of Castel Belasi

The Belasi castle was founded in 1300 near Segonzone village, in the Non valley. It is one of the most interesting local examples of castle developed from the original medieval bastion, a pentagonal donjon surrounded by a bailey, into the residential palace, erected in the 15th-16th centuries and transformed during the 18th century (fig. 1).

The north-east wing is dated from the end of the 15th century, together with the building linking it to the donjon. It was the original residential core, relegated to servants’ quarters after the restoration works in the 18th century. It was also the part of the castle that suffered first, when the building was left in a state of neglect, in the first decades of the 20th century.

Indeed, the extinction of the Khuen family, owner of the castle, caused the gradual disrepair of the building. A timber slab in the north wing and parts of the roofs ruined, the shutters and doors were removed and the interiors were partially exposed to weathering. Since 1952 the local Superintendence of Cultur-



Fig. 1. View of the Belasi Castle
Rys. 1. Widok zamku Belasi

Uwzględniono kryteria podane we „Wskazówkach na temat analizy, konserwacji i renowacji konstrukcji dziedzictwa architektonicznego”, przygotowanych przez komitet ICOMOS ISCARSAH (Międzynarodowy Komitet ds. Analizy i Renowacji Konstrukcji Dziedzictwa Architektonicznego) [1].

Proces odnawiania podzielono zgodnie z normą UNI nr 11138:2004 [2], czyli na:

- prewencyjną ocenę stanu konstrukcji,
- planowanie interwencji,
- właściwą interwencję,
- kontrolę skuteczności interwencji.

2. Podłogi drewniane w Castel Belasi

Zamek Belasi powstał w 1300 r. niedaleko wioski Segonzone w dolinie Non. Jest to jeden z najciekawszych w okolicy przykładów zamku powstałego z pierwotnego średniowiecznego bastionu, pięcokątnego donżonu otoczonego murami obronnymi, przekształconego w pałac mieszkalny wzniesiony w XV-XVI w. i przebudowany w XVIII w. (rys. 1).

Północno-wschodnie skrzydło pochodzi z końca XV w., kiedy to powstał także budynek łączący je z donżonem. To była pierwotna część mieszkalna, która po pracach renowacyjnych w XVIII w. została przekształcona w mieszkania dla służby. To właśnie ta część zamku ucierpiała jako pierwsza, kiedy zamek popadł w zapomnienie w pierwszych dziesięcioleciach XX w.

Faktycznie, kiedy umarli ostatni przedstawiciele rodziny Khuen, która była właścicielem zamku, budynek zaczął stopniowo niszczyć. Drewniane stropy w północnym skrzydle i część dachów zostało zniszczonych, okiennice i drzwi zniknęły i część wewnątrz była wystawiona na działanie zjawisk atmosferycznych.

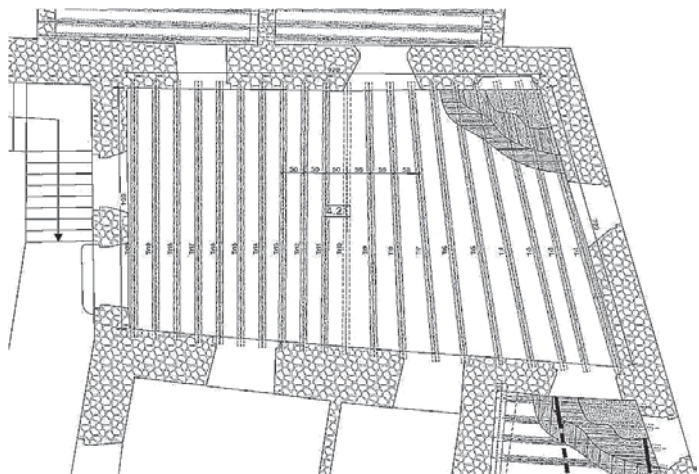


Fig. 2. Plan of the studied floor
Rys. 2. Plan omawianej podłogi

al Heritage has carried out a series of punctual actions, in order to check the development of damages and decay. However, only in 2000 the castle was bought by the Trento Province, and a comprehensive conservation action was undertaken.

The first interventions on the timber floors involved the north-east wing, where simple board timber floors are present. The works started with the room in figure 2. The room has a trapezoidal shape; the twenty timber beams have variable reciprocal distances (99-50 cm) and span length (6-7.2 m).

Despite the simplicity of the structure, a throughout investigation campaign was carried out, in order to determine its current and future structural performance.

3. Preventative evaluation of the actual conditions

The aim of a preventative evaluation is to understand the performance of the overall static suitability of a building and the role of the timber structure within the building. Therefore, it is propaedeutic, but not exclusively aimed, at the definition of possible intervention strategies.

It is the result of a systematic survey, carried out on several fronts, which can be summed up, according to the UNI standard 11138:2004, as following:

- historical analysis,
- geometrical characterization,
- characterization of decay,
- characterization of material,
- structural analysis.

The historical analysis is based on the scrutiny of documentary and material sources, in order to collect information about the past history of the studied structure; in particular, about contingent damages, disuse, demolition or modifications. A dendrochronological analysis of the wooden member [3] can play an important role in dating the artefact. Also a comparative analysis with nearby and contemporary structures can be helpful; in this case, typological correspondences and variances are evaluated.

The investigated documentary sources (i.e. [4]) and a survey of other castles in Trentino, namely the Valer castle (XII century), the Sporo-Ravina castle (XII century) and the Belfort castle (XIV century), gave information about the transformations incurred by the building. Dating of the studied floor, however, is still uncertain.

A detailed geometric survey was carried out on the structure and on each element. In order to record the contingent variation of dimension and shape of

ferycznych. Od 1952 r. miejscowy Inspektorat Dziedzictwa Kulturowego podjął serię szybkich działań, aby skontrolować postępy uszkodzeń i niszczenia. Ale dopiero w 2000 r., kiedy zamek został wykupiony przez Prowincję Trydent, została rozpoczęta kompleksowa konserwacja.

Pierwszą interwencję na podłogach drewnianych podjęto w północno-wschodnim skrzydle, gdzie znajdowały się proste podłogi z desek drewnianych. Prace rozpoczęto od pokoju pokazanego na rys. 2. Pokój ma kształt trapezu; dwadzieścia dźwigarów ma różne rozstawy (99-50 cm) i długości (6-7,2 m).

Pomimo prostoty tej konstrukcji, przeprowadzono dokładne badania, aby sprawdzić jej obecną i przyszłą efektywność.

3. Prewencyjna ocena aktualnego stanu

Celem prewencyjnej oceny jest zrozumienie efektywności całej statycznej adaptacji budynku i roli konstrukcji drewnianej w tej budowlu. Dlatego jej podstawowym, choć nie jedynym zadaniem jest zdefiniowanie możliwych strategii interwencji.

Ocena ta jest oparta na systematycznych badaniach na kilku frontach, które można podsumować tak, jak w normie UNI nr 11138:2004:

- analiza historyczna,
- charakterystyka geometryczna,
- charakterystyka zniszczeń,
- charakterystyka materiału,
- analiza konstrukcji.

Analiza historyczna opiera się na zbadaniu źródeł archiwalnych i materialnych w celu zebraniu informacji o przeszłości danej konstrukcji; w szczególności o przypadkowych uszkodzeniach, niewłaściwym użytkowaniu, celowym niszczeniu lub zmianach. Analiza dendrochronologiczna elementów drewnianych [3] może grać istotną rolę w procesie datowania elementów. Pomocna może być także analiza porównawcza zestawiająca badaną konstrukcję z innymi pobliskimi lub współczesnymi konstrukcjami; ocenia się wówczas podobieństwa i różnice typologiczne.

Kwerenda dokumentów źródłowych (np. [4]) oraz badanie innych zamków w Trydencie, konkretnie zamku Valer (XII w.), zamku Sporo-Ravina (XII w.) oraz zamku Belfort (XIV w.), przyniosły dane na temat zmian, jakie zaszły w budynku. Nadal jednak nie ma pewności co do daty powstania badanej podłogi.

Całą konstrukcję oraz każdy jej element poddano szczegółowej analizie geometrycznej. Aby zapisać przypadkowe zmiany rozmiaru i kształtu prze-

the transverse section, which has to be taken into account in calculation, each member was surveyed at regular interval. The causes of the existing deformations, on single timber members and on the structure, have been indicated in the inspection report, distinguishing between the deformations deriving from applied stresses or creep effects, and those caused by material features. In particular, considerable deflection has been observed on some members.

In the phase of the decay characterization both biotic decay and mechanical damages should be evaluated. The interaction between biotic decay and microclimate conditions was analysed. For this purpose, the identification of the thermo-hygrometric environment [5] and the consequent hygrometric state of the wood is necessary. The investigated floor, even if protected by the roof, was subjected to temperature and humidity variations, because of the lack of external shutters at the windows.

Visual inspection was performed according to the UNI standard 11119:2004 [6]. Complementary to visual observations, resistance drilling tests were carried out, in order to identify and quantify deterioration of the timbers. Logs of multiple drillings along the length of the timber element were used to map the extent and penetration of deterioration in the member (fig. 3). The integral of the drill resistance function divided by the penetration length was used to give an objective interpretation of the tests [7] (fig. 4). Also this parameter, however, must be carefully determined, being affected i.e. by drill orientation and presence of splits or checks.

kroju poprzecznego, które trzeba uwzględnić w obliczeniach, każdy element sprawdzano kilkakrotnie. Przyczyny powstania odkształceń obecnych w poszczególnych elementach drewnianych i całej konstrukcji wskazano w raporcie z badań, w którym odróżniono odkształcenia spowodowane obciążeniem i ruchem od odkształceń wynikających z cech materiału. Zauważono w szczególności znaczne ugięcie niektórych elementów.

W fazie charakterystyki zniszczeń należy ocenić zarówno niszczenie biotyczne, jak i uszkodzenia mechaniczne. Zanalizowano interakcje między niszczeniem biotycznym a warunkami mikroklimatycznymi. W tym celu potrzebna jest znajomość środowiska termicznego i wilgotności [5] oraz wynikającego z nich stanu wilgotności drewna. Choć badana podłoga była chroniona dachem, podlegała działaniu temperatury i zmian wilgotności, ponieważ w oknach nie było okiennic.

Dokonano wzrokowej oceny zgodnie z normą UNI nr 11119:2004 [6]. Oprócz obserwacji wzrokowej przeprowadzono także wiercenia, aby zidentyfikować i uszeregować stan zniszczenia drewna. Za pomocą serii wierceń wzdłuż elementów drewnianych opracowano mapę zakresu i głębokości zniszczeń w poszczególnych elementach (rys. 3). Użyto całki funkcji odporności na wiercenie podzielonej przez głębokość, co pozwoliło na opracowanie obiektywnej interpretacji testu [7] (rys. 4). Również ten parametr wymaga staranności przy ustalaniu, ponieważ może go zniekształcić ustawienie wiertła lub obecność szczelin i pęknięć.

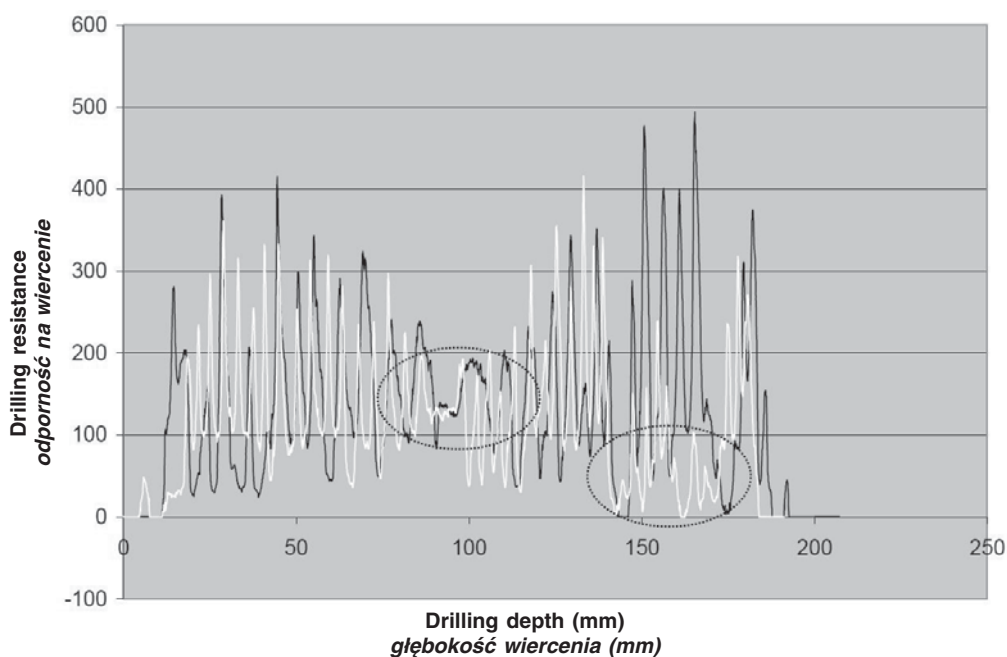


Fig.3. Superimposition of drilling patterns in two different sections of a member
Rys. 3. Nałożone na siebie wzory wiercenia w dwóch różnych odcinkach jednego elementu

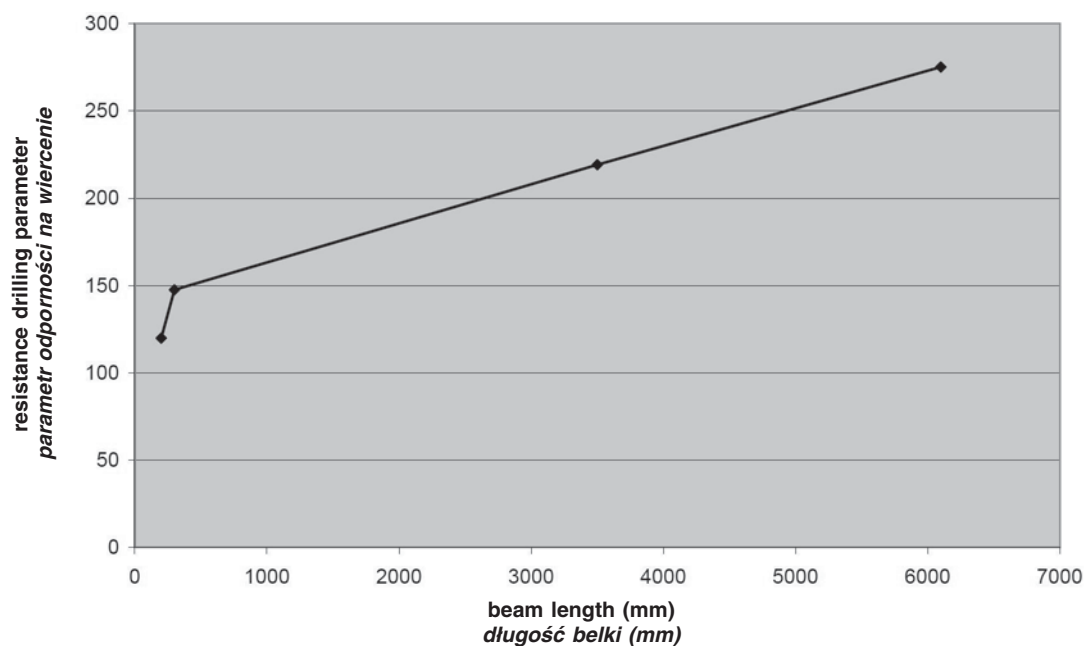


Fig.4. Curve of the drilling resistance parameter along the member
Rys. 4. Krzywa parametru odporności na wiercenie wzdłuż elementu

The likely causes of deterioration were identified for the purpose of assessing the residual effective cross section of each member, establishing effective remedial treatments and repairs, and addressing long-term maintenance needs. The timbers that make up the floors beam were found to be generally in good condition. There are some exceptions. Some elements have deterioration on the upper face of the timber that penetrates to various depths, a condition called channelizing. This type of decay was caused by insect attack, in particular by saprophyte anobiid beetles (*Anobium punctatum*). Insects also severely infested the floorboards. More serious attacks have been found close to some beams bearings, where stagnation has favoured rot.

A diagnostics campaign for the characterization of the material was carried out, in order to assess the mechanical parameters of each wooden member. The mechanical characterization of timber elements on-site, especially of those which serve as load bearing structures in buildings of cultural interest, requires the avoidance, or at least the limitation, of damages to the structure and the single elements. In this case, the two alternative, or better, complementary approaches are the visual strength grading and the non-destructive measurements of properties.

Preliminary, wood species identification and moisture content estimation should be carried out, according to current standards. The identification of the wood species of the floor beams was carried out by means of macroscopic inspection method [8]. Visual examinations identified larch (*Larix decidua* Mill). The wood moisture content was estimated

Aby ocenić końcowy faktyczny przekrój każdego elementu, wyznaczyć efektywne procedury naprawcze i remontowe oraz rozważyć długoterminowe potrzeby konserwacji, zidentyfikowano prawdopodobne przyczyny zniszczeń. Okazało się, że drewno użyte do konstrukcji dźwigarów podłogi jest zasadniczo w dobrym stanie z kilkoma wyjątkami. W kilku elementach wykryto uszkodzenia górnej powierzchni drewna sięgające różnej głębokości, nazywane żłobkowaniem. Ten rodzaj uszkodzeń powodują insekty, zwłaszcza kołatek domowy (*Anobium punctatum*). Również deski podłogowe były mocno zaatakowane przez insekty. Poważniejsze uszkodzenia odkryto w pobliżu podpór dźwigarów, których położenie sprzyja rozwojowi procesów gnilnych.

Przeprowadzono diagnostykę, aby scharakteryzować materiał i ocenić parametry mechaniczne każdego elementu drewnianego. Mechaniczna charakterystyka elementów drewnianych na miejscu, zwłaszcza tych, na których opierają się obciążenia w budynku o dużym znaczeniu kulturowym, wymaga ostrożności, aby uniknąć, a przynajmniej ograniczyć uszkodzenia konstrukcji i poszczególnych elementów. W tym przypadku istnieją dwa alternatywne, a właściwie komplementarne podejścia: wizualne określenie wytrzymałości i określenie właściwości metodami nieniszczącymi.

Wstępną identyfikację gatunku drewna i oszacowanie zawartości wilgotności należy przeprowadzić zgodnie z obowiązującymi normami. Gatunek drewna w dźwigarach podłogi identyfikuje się metodą inspekcji makroskopowej [8]. Badanie wzrokowe pozwoliło na identyfikację modrzewia (*Larix decidua* Mill). Zawartość wilgoci w drewnie oszacowano

by pin type moisture meter [9]. Insulated needle electrodes were driven in about one-third the thickness of the wood to determine the average moisture content of the entire piece. According to UNI 11035:2003 [10], the measures on three faces of each element were averaged.

In order to visually grade the timbers, the strength affecting features of each wooden member (such as position of the pith, rate of growth, slope of grain) as well as the type, position and extension of main defects (i.e. knots, shrinkage shakes and checks) were surveyed according to the UNI standards 11035:2003 part 1 and 11119:2004 (Tab. 1). Visual analysis was particularly facilitated by the possibility of accessing the elements from both the intrados, by means of scaffolds, and from the extrados, after dismantling the decayed floorboards.

miernikiem wilgotności typu pin [9]. Elektrody z igieł z izolacją wprowadzono mniej więcej na głębokość jednej trzeciej grubości drewna, aby ustalić przeciętną zawartość wilgoci w całym elemencie. Zgodnie z normą UNI 11035:2003 [10], uśredniono pomiary z trzech powierzchni każdego elementu.

Aby sklasyfikować drewno wizualnie, zbadano siłę wpływającą na właściwości poszczególnych elementów drewnianych (np. położenie miękiszu, wskaźnik wzrostu, nachylenie słoje), a także rodzaj, położenie i zakres głównych uszkodzeń (np. sęków, pęknięć spowodowanych kurczeniem i zarysowań), zgodnie z normami UNI nr 11035:2003 część 1 i 11119:2004 (Tab. 1). Analiza wzrokowa była łatwiejsza, ponieważ można było dostać się do poszczególnych elementów zarówno od strony podniebienia (dzięki rusztowaniom), jak i od strony grzbietowej po zdemonstrowaniu zniszczonych desek podłogowych.

Tab. 1. Example of piecewise grading of a timber member
Przykładowa klasyfikacja jednostkowa elementu drewnianego

Element <i>Element</i>	Wanes <i>Obliny</i>	Checks <i>Pęknięcia</i>	Knots <i>Sęki</i>	Knots groups <i>Grupy sęków</i>	Slope of grain <i>Nachylenie włókna</i>	Splits <i>Szczelina</i>	Strength class <i>Klasa wytrzymałości</i>
1-A	≤ 1/5	/	≤ 1/3	≤ 2/5	≤ 10%	/	II
A-A'	≤ 1/5	/	≤ 1/3	≤ 2/5	≤ 10%	/	II
A'-B	≤ 1/5	/	≤ 1/5	≤ 2/5	≤ 10%	/	II
B-C	≤ 1/8	/	≤ 1/3	≤ 2/5	≤ 10%	/	II
C-D	≤ 1/5	/	≤ 1/5	≤ 2/5	≤ 10%	/	II
D-E	≤ 1/8	/	≤ 1/5	≤ 2/5	= 10%	/	I
E-2	≤ 1/8	/	≤ 1/5	≤ 2/5	= 10%	/	I
Strength class of the beam II <i>Klasa wytrzymałości belki: II</i>							

Through the knowledge on wooden specie, geometry and morphology of the beam, defect position and extension and with the results from non destructive instrumental inspection, each timber element, and eventually a part of it, was graded according to strength [11].

Results of visual strength grading have to be considered indicative estimation of the inferred property. They shall be verified and compared with the results of other investigations.

In the reported study, the direct measurement of the bending stiffness of a single beam was carried out on site (Fig 5-6). For this purpose, after dismantling the decayed floorboards, a timber formwork was built on the beam, and then waterproofed with nylon sheets. The beam was instrumented at the intrados with five displacement sensors, and then monotonically loaded and unloading pouring water, with load steps of 0.5 kN/m² and maximum load

Dzięki dokładnej znajomości gatunku drewna, geometrii i morfologii belki, położenia i zakresu uszkodzeń połączonej z wynikami badań nieniszczących, każdemu elementowi drewnianemu, a nawet każdej jego części, przypisano klasę wytrzymałości [11].

Wyniki wizualnej klasyfikacji wytrzymałości należy traktować jako wskazówkę i oszacowanie tej cechy. Są one weryfikowane i porównywane z wynikami innych badań.

W omawianym przypadku na miejscu przeprowadzono bezpośredni pomiar odporności pojedynczych dźwigarów na zginanie (rys. 5-6). W tym celu, po rozebraniu zniszczonych desek podłogowych, na dźwigarach zbudowano drewnianą ramę i pokryto ją wodoodpornymi folią nylonową. Zbadano podniebienie belki za pomocą pięciu czujników przemieszczeń, a następnie ją obciążano i odciążano za pomocą wylewania wody. Interwały obciążenia

of 2 kN/m^2 . According to the picture the board cross-ly disposed to the beam were cut in the middle, in order to avoid load transmission to not investigated lateral beams.



Fig. 5. On site bending test: loading system
Rys. 5. Test zginania na miejscu: system obciążania

4. Planning intervention

On the basis of the accurate diagnostic survey, structural restoration interventions have been proposed for the refurbishment of the floor in object.

In order to preserve, as much as possible, the integrity of the existing timber beams, interventions have been kept to the minimum level meeting structural requirements. Substitution of members has been proposed only for those elements that were severely and extensively degraded. A total substitution, however, was necessary for the floorboards.

Recommendations emphasize the use of compatible materials and reversible repair techniques. These requirements are generally met in traditional solutions, which use wood to reinforce or substitute decayed elements or parts, often coupled with mechanical connections, such as nails, bolts, screws, bands and metallic plates.

In the proposed intervention both well-established and innovative wood-wood techniques have been adopted.

Local reconstruction by means of wooden prosthesis has been proposed to repair decayed beam heads. Such substitutions are made with the apposition of wood boards of larch, taken from sound parts of the dismantled elements, which have same seasoning and colour characteristics of the repaired members. The wooden boards are assembled with the system of gluing with bi-components resins in combination with mechanical connections, constituted by self-threading stainless steel.

In order to increase the bending stiffness of the main elements, an innovative refurbishment technique has been adopted, where the beams are cou-

wynosiły $0,5\text{ kN/m}^2$, zaś maksymalne obciążenie wyniosło $2,0\text{ kN/m}^2$. Jak widać na rysunkach, deski poprzecznie oparte na dźwigarze przecięto na pół, aby obciążenie nie przenosiło się i aby badanie nie objęło dźwigarów bocznych.

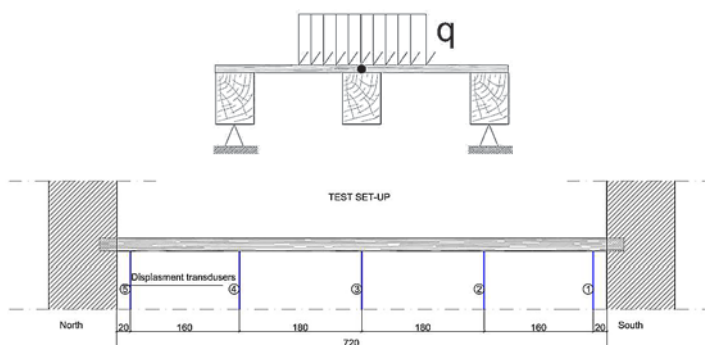


Fig. 6. On site bending test: measurement system
Rys. 6. Test zginania na miejscu: system pomiarów

4. Planowanie interwencji

Na podstawie dokładnych badań diagnostycznych zaproponowano interwencję konserwującą konstrukcję w celu odnowienia omawianego stropu.

Aby w miarę możliwości zachować ciągłość istniejących drewnianych dźwigarów, interwencję ograniczono do minimalnego poziomu spełniającego wymogi konstrukcyjne. Zaproponowano wymianę elementów tylko w przypadku tych części, które uległy poważnemu i rozległemu zniszczeniu. Konieczna była jednak całkowita wymiana desek podłogowych.

W zaleceniach podkreśla się konieczność używania kompatybilnych materiałów i odwracalnych technik naprawczych. Wymogi te są zwykle spełnione w przypadku tradycyjnych rozwiązań z wykorzystaniem drewna do wzmocnienia lub wymiany zniszczonych elementów lub części, zwykle z zastosowaniem połączeń mechanicznych, np. gwoździ, sworzni, śrub, taśm i płyt metalowych.

Zaproponowana interwencja obejmowała zarówno uznane, jak innowacyjne techniki połączenia drewno-drewno.

Do naprawy zniszczonych głowic dźwigarów zaproponowano miejscową rekonstrukcję za pomocą drewnianych protez. W takim przypadku stosuje się wstawianie drewnianych elementów z modrzewia, uzyskanych z niezniszczonych części rozmontowanych elementów, o takich samych właściwościach sezonowania i kolorystycznych co naprawiane elementy. Drewniane deski łączy się kompozycją klejową na bazie żywic dwukomponentowych oraz samogwintujących się łączników mechanicznych ze stali nierdzewnej.

Aby poprawić wytrzymałość głównych elementów na zginanie, zastosowano innowacyjną technikę

pled with thick timber planks, connected with crossed self tapping and full threaded screws, disposed with an inclination of 45°. The structural behaviour of the resulting timber composite structure is governed by the strength and stiffness of the connector system adopted. Therefore, before to implement the method through the reported in situ application, a comprehensive research was carry out, at the laboratory of Materials and Structural Testing at the University of Trento, with the scope of investigating the mechanical properties of continuous threaded screws connectors, and providing a reliable engineered model to predict strength and stiffness of the joints [12].

The advantages of the proposed method, compared with pioneering floor refurbishment systems, such as those, which couple the existing timber floor with a concrete slab [13], are the reversibility, the minimal sacrifice of material (the new timber planks could be placed over the existing floorboards, if sound), the compatibility and stability of the repair materials, the reduction of the original permanent loads. Moreover the proposed innovative connection system with crossly arranged screws proved to provide higher values of stiffness, when compared to traditional system with glued or dry steel bars inserted in predrilled holes perpendicular to the beam.

5. Execution and efficiency control of the intervention

An incremental approach has been adopted for the execution of the intervention.

In order to control on site the efficiency of the new refurbishment technique, the intervention was checked, first, only on the beam that was preliminary tested. The beam was coupled with glulam planks (strength class GL 24h according to EN 1194:1999 [14]), 70 mm in thickness. The new floorboard portion, large 500 mm, rested symmetrically and solely on the test beam. Self-tapping double thread screws of WT-T-8.2 type manufactured by SFS Intec were used, of two different lengths: L=190 and L=220 mm, strength class 10.9 ($f_{u,k} = 1000$ MPa). The main feature is that each screw has two threads of different pitch but of equal length: one for penetrating and the other for tightening. The disposal of the inclined screws is designed to contribute to the stiffness of the connection, in case of both shear-compression and shear-tension load conditions. Moreover, screws are staggered, in order to avoid the occurrence of splits along the fiber. The geometric scheme of the connection system is illustrated in figure 9.

odnawiania, w której dźwigary są uzupełniane grubymi drewnianymi klepkami o skrzyżowanych wkrętach samogwintujących, które mogą odchyłać się o 45°. Funkcjonowanie powstałej w ten sposób złożonej konstrukcji drewnianej jest zależne od wytrzymałości i sztywności użytego systemu połączeń. Dlatego przed użyciem tej metody w praktyce na miejscu przeprowadzono kompleksowe badania w Laboratorium Materiałów i Testów Konstrukcyjnych Uniwersytetu Trydenckiego, których przedmiotem były mechaniczne właściwości samogwintujących złączy śrubowych. Owoce badań był wiarygodny model inżynierski pozwalający przewidywać wytrzymałość i sztywność złączy [12].

Proponowana metoda ma kilka zalet nad pionierskimi systemami renowacji podłóg, takimi jak uzupełnianie istniejącej posadzki drewnianej płytami betonowymi [13]: jest odwracalna, poświęca się bardzo niewiele materiału (nowe klepki drewniane można umieścić nad istniejącymi deskami podłogowymi, jeśli są one w dobrym stanie), kompatybilność i stabilność materiałów użytych do naprawy, redukcja pierwotnych obciążeń stałych. Poza tym dowiedziono, że proponowany innowacyjny system połączeń z krzyżowym ustawieniem wkrętów zapewnia większą sztywność w porównaniu do tradycyjnego systemu klejonych lub prętów stalowych umieszczanych w wywierconych wcześniej otworach prostopadłych do dźwigara.

5. Realizacja i kontrola skuteczności interwencji

W realizacji interwencji zastosowano podejście przyrostowe.

Aby skontrolować na miejscu skuteczność nowej techniki odnawiania, najpierw sprawdzono jakość interwencji w przypadku dźwigara wyłącznie po wstępnych testach. Dźwigar uzupełniono klepkami z mikrowczepami (klasa wytrzymałości GL 24h według normy EN 1194:1999 [14]), o grubości 70 mm. Nową część posadzki o wielkości 500 mm oparto symetrycznie i wyłącznie na testowanym dźwigarze. Zastosowano samogwintujące się podwójne śruby typu WT-T-8.2, wyprodukowane przez SFS Intec o dwóch różnych długościach: L=190 i L=220 mm, klasa wytrzymałości 10.9 ($f_{u,k} = 1000$ MPa). Istotne jest, że każda śruba ma dwa gwinty o różnych podziałkach przy takiej samej długości: jeden służy do penetracji, a drugi do umacniania. Właściwości takich śrub mają zwiększyć sztywność łącza i odporność na obciążenia ścinające przy ściskaniu oraz przy rozciąganiu. Poza tym śruby mają układ schodkowy, aby zapobiec pęknięciom wzdłuż włókien. Schemat geometryczny systemu złączy pokazano na rys. 9.

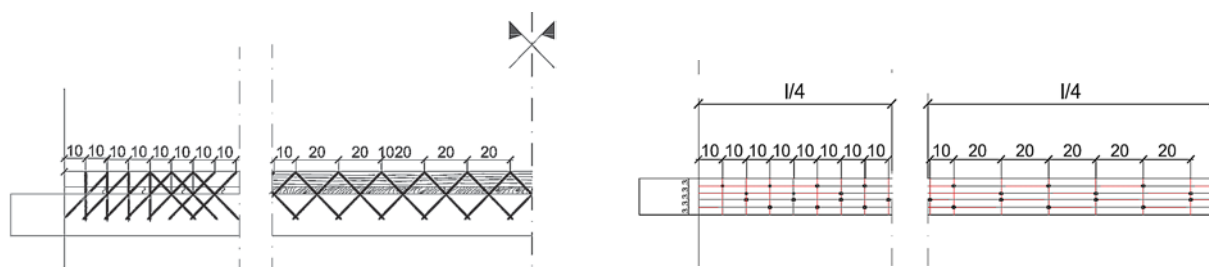


Fig. 7. Plan and section of the composite structure and geometry of the connections system
Rys. 7. Plan i przekrój złożonej struktury i geometrii systemów łączenia

After the execution of the intervention, the repaired portion of the floor has been bending tested, as it was done with the unrepaired beam. In this case, the maximum test load was 4.5 kN/m^2 , with load steps of 0.5 kN/m^2 .

6. Discussion

Structural analysis refers not only to the present condition of the structure, but also to the situation after repairs, in order to evaluate their benefits.

In the case of the studied timber floor, a simplified planar frame analysis can be performed for the case of wood to wood composite structure with semi-rigid connection system. The mechanical parameters adopted in the model have been derived from the preliminary analysis on the existing timber, and from the model proposed by the authors for connections system [12].

Nevertheless, particular attention must be paid when modelling the boundary condition at the heads of beams. Indeed, the actual behaviour of the beam tested in situ differs from both the hypothesis of sim-

Po realizacji interwencji, naprawiony fragment podłogi poddano testom na zginanie, takim jak w przypadku nienaprawionego dźwigara. Tym razem maksymalne obciążenie wyniosło $4,5 \text{ kN/m}^2$ przy interwałach $0,5 \text{ kN/m}^2$.

6. Dyskusja

Analiza konstrukcyjna odnosi się nie tylko do aktualnego stanu konstrukcji, ale także do sytuacji po naprawach, aby ocenić również korzyści z napraw.

W przypadku omawianej podłogi drewnianej można zastosować uproszczoną ramową analizę płaszczyznową do złożonej konstrukcji drewniano-drewnianej z półsztywnym systemem złączy. Parametry mechaniczne użyte w tym modelu wyprowadzono ze wstępnych analiz istniejącego drewna i z modelu zaproponowanego przez twórców systemu złączy [12].

Trzeba jednakże być szczególnie uważnym przy modelowaniu warunków granicznych przy głowicach dźwigarów. Faktyczne zachowanie dźwigara zbadane na miejscu różni się od hipotezy swobodnie opartego i

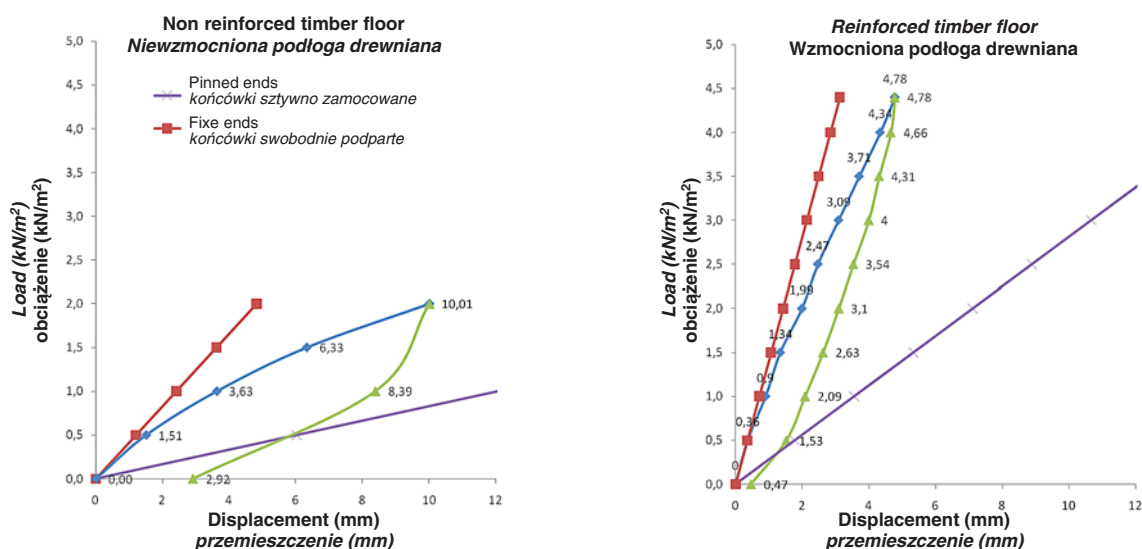


Fig. 8. Theoretical deflections, calculated modelling the element both as a simple-supported and as a fixed-fixed beam, compared with the experimental displacements for the cases of reinforced and unreinforced beams

Rys. 8. Teoretyczne odchylenia obliczone przy modelowaniu elementu zarówno przy założeniu swobodnego podparcia, jak i dźwigarów sztywno zamocowanych w porównaniu z eksperymentalnymi przemieszczeniami w przypadku wzmocnionych i niewzmocnionych dźwigarów

ply supported and fixed-fixed beam, being the constraints at the ends semi-rigid (fig. 10).

Even if the value of the experimental deflection in the initial phase is closer to that of the fixed-fixed beam, the real behaviour of the member deviates, in a non-linear way, from that depicted by this model.

7. Conclusions

Any planning for structural conservation requires investigative actions, based on the direct observation of material decay and structural damage, historical research etc., as well as on specific tests and mathematical models. Despite the difficulties of this multidisciplinary process, some guidelines and standards have been developing, specifically for historic structures, in order to avoid ambiguities and arbitrary decisions.

In particular, any intervention measure should be justified, through the diagnostic phase and the consequent safety evaluation, taking into account the uncertainties in the data assumed and the difficulties of a precise evaluation of the phenomena. Moreover, any intervention should be indispensable, minimal, reversible, compatible and use technologies possessing a proven performance. Therefore, both numerical and experimental tests, in laboratory and on site, have been carried out, in order to assess the efficiency of the proposed strengthening technique.

Acknowledgements

The research was founded by the Italian ReLUIS Consortium, within the research program carried out for the Italian Agency for Emergency Management. M. Riggio was supported by the Provincia Autonoma di Trento, with the post-doc fellowship titled "DIGITIMBER (DIGItal technologies in TIMBER Restoration)". The Authors wish also to thank the company Rothoblaas s.r.l., for supplying the WT-T-8.2 screws and glued laminated wood, the Soprintendenza Beni architettonici P.A.T. and the SWS-Engineering S.p.A., for having trusted and encouraged the application of the implemented technology on site.

sztywno zamocowanego dźwigara z powodu ograniczeń przy półsztywnych zakończeniach (rys. 10).

Nawet jeśli wartość eksperymentalnego odchylenia w początkowej fazie jest bliższa wartościom zamocowanego dźwigara, faktyczne zachowanie elementów różni się w sposób nieliniowy od modelowego.

7. Wnioski

Planowanie konstrukcyjnej strukturalnej zawsze wymaga działalności badawczej w oparciu o bezpośrednią obserwację zniszczenia materiału i uszkodzeń konstrukcyjnych, o badania historyczne itp., a także specyficzne testy i modele matematyczne. Pomimo iż ten interdyscyplinarny proces jest bardzo trudny, stworzono pewne wytyczne i normy, zwłaszcza w odniesieniu do konstrukcji historycznych, aby uniknąć dwuznaczności i arbitralnych decyzji.

W szczególności należy uzasadnić interwencję w fazie diagnostycznej, a następnie w ocenie bezpieczeństwa, uwzględniając niepewność szacunkowych danych oraz trudności w precyzyjnej ocenie zjawisk. Interwencja powinna być ponadto niezbędna, minimalna, odwracalna, kompatybilna i powinna opierać się na technologiach o udowodnionej skuteczności. Dlatego przeprowadzono zarówno teoretyczne, jak i eksperymentalne badania laboratoryjne i na miejscu, aby ocenić skuteczność zaproponowanej techniki wzmocnienia.

Podziękowania

Badania sfinansowało włoskie konsorcjum ReLUIS w ramach programu badawczego prowadzonego dla Włoskiej Agencji ds. Zarządzania Zagrożeniami. M. Riggio otrzymał od Autonomicznej Prowincji Trydentu stypendium podoktoranckie zatytułowane „DIGITIMBER (DIGItal technologies in TIMBER Restoration – Techniki Cyfrowe w Restaracji Drewna)”. Autorzy chcą także podziękować firmie Rothoblaas s.r.l., która dostarczyła śruby WT-T-8.2 i klejone laminowane drewno, urzędowi Soprintendenza Beni architettonici P.A.T. oraz SWS-Engineering S.p.A. za zaufanie i zachętę do zastosowania w praktyce realizowanej technologii.

References • Literatura

- [1] ICOMOS, *Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage*, 2001.
- [2] UNI 11138, *Cultural heritage – Wooden artefacts – Building load bearing structures – Criteria for the preliminary evaluation, the design and the execution of works*. Milano, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2004.
- [3] UNI 11141, *Cultural heritage – Wooden artefacts – Guidelines for wood dendrochronological dating*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2004.
- [4] Turrini M., *Castel Belasi e i conti Khuen*, Mondadori Printing, Cles (TN), 2000.
- [5] UNI 11202, *Cultural heritage – Wooden artefacts – Determination and classification of environmental conditions*. Milano, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2007.
- [6] UNI 11119, *Cultural Heritage – Wooden artifacts – Load-bearing structures – On site inspections for the diagnosis of timber members*. Milano, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2004.
- [7] Feio, A.O., Machado, J.S., and Lourenco, P.B., *Parallel to the Grain Behavior and NDT Correlations for Chestnut Wood (Castanea Sativa Mill)*. In: Proc: Conservation of Historic Wooden Structures. Florence 2005, (I), pp. 294-303.
- [8] UNI 11118, *Cultural heritage – Wooden artefacts – Criteria for the identification of the wood species*. Milano, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2004.
- [9] EN 13183-2, *Moisture content of a piece of sawn timber – Part 2: Estimation by electrical resistance method*. European Committee for Standardization. Brussels, 2002.
- [10] UNI 11035-1, *Structural timber. Visual strength grading: terminology and measurement of features*. Milano, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2003.
- [11] UNI 11035-2, *Structural timber. Visual strength grading rules and characteristic values for italian structural timber population*. Milano, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2003
- [12] Crosatti A., Piazza M., Tomasi R., Angeli A., Refurbishment of traditional timber floor with inclined screw connectors. In: *Proc. prohitech09, Protection of Historical Buildings 1st Int. Conf.* Rome, June 21st-24th, 2009.
- [13] Turrini G., Piazza M., *Il comportamento statico della struttura mista legno calcestruzzo*, in *Recupera*: 6, 1983.
- [14] EN 1194, *Timber structures – Glued laminated timber – Strength classes and determination of characteristic values*. European Committee for Standardization. Brussels, 1999.

* Dep. of Mechanical and Structural Engineering, University of Trento, Trento, Italy
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Strukturalnej, Uniwersytet Trydencki, Trydent, Włochy
** Fixing Engineering, Rotho Blaas® Srl, Cortaccia (BZ)
Inżynieria naprawcza, Rotho Blaas® Srl, Cortaccia (BZ)

Abstract

Conservation is an elaborate and multidisciplinary process, involving different operational stages. Criteria for the preliminary evaluation, the intervention planning, execution and control, established both at international and national level, have been followed for the rehabilitation of a timber floor in the Belasi Castle (Trentino, Italy). In particular, the paper stresses the importance of the investigation actions, for the knowledge of the actual state of the structure, as well as for the choice, calibration and control of the repair intervention. *A fortiori*, comprehensive analyses are required, if new techniques are adopted, as the one described in the paper.

Streszczenie

Konserwacja to skomplikowany i interdyscyplinarny proces złożony z wielu etapów. Kryteria wstępnej oceny, planowania interwencji, wykonania i kontroli, wprowadzone na poziomie międzynarodowym i krajowym, zostały zastosowane do odnowienia drewnianej podłogi w zamku Belasi (Trydent we Włoszech). Artykuł akcentuje szczególnie znaczenie działań badawczych dla poznania faktycznego stanu konstrukcji, a także wyboru, kalibracji i kontroli interwencji naprawczej. *A fortiori*, kompleksowe analizy są konieczne, jeśli używa się nowych technik, tak jak w przypadku omawianym w artykule.