

XXX cycle | Ph.D. in Architecture and Urban Planning Engineering

Sapienza University of Rome

in agreement for a joint Research Doctoral thesis with Technische Universität Wien

XXX ciclo | Dottorato di Ricerca in Ingegneria dell'Architettura e dell'Urbanistica

Sapienza Università di Rome

in Co-tutela con Technische Universität Wien

An integrated simulation model to support the design of
low-impact construction sites in healthcare facilities

Un modello integrato di simulazione per supportare
la progettazione di cantieri ospedalieri a *basso impatto*

Ein integriertes Simulationsmodell zur Unterstützung
der Gestaltung von Krankenhausbaustellen mit möglichst
geringer Auswirkung auf den laufenden Betrieb

Ph.D. candidate:

Ugo Maria Coraglia

Supervisors at Sapienza University of Rome:

Prof. A. Fioravanti

Prof.ssa D. D'Alessandro

Supervisor at Technische Universität Wien:

Priv. Doz. G. Wurzer

Index

Abstract.....	2
English	4
Italiano	5
Deutsch.....	6
Keywords	8
1. Introduction.....	10
1.1. Problems characterising within the hospital setting and healthcare construction sites.....	12
1.2. Problems in the management process of a multidisciplinary design model.....	18
2. Evolution of the hospital over the centuries.....	26
3. State of art.....	52
3.1. Italian and international guidelines	54
3.2. Proactive approach and risk matrix	62
4. Background	70
4.1. Building Information Models	72
4.2. Agent-based modelling and simulation	76
5. Conceptual framework.....	80
5.1. Knowledge Base and model	82
5.2. Simulation	86
5.3. Visualisation.....	90
5.4. Conceptual framework schema	92
6. Prototype Cellular Automata (CA) model	94
6.1. Introduction for the CA prototype	96
6.2. Development of the CA prototype	100
6.2.1. Representation of the hospital environment as CA model	100
6.2.2. Localisation and visualisation of construction and routine activities in the CA model	102
6.2.3. Implementation of the simulation based on particles within the CA model.....	106
6.2.3.1. Simulation of noise.....	108
6.2.3.2. Simulation of vibration	110
6.2.3.3. Simulation of dust.....	114
6.3. Prototype – case study	124

6.4.	Observations	124
7.	Extending the prototype with project schedules.....	128
7.1.	Introduction for extending the prototype.....	130
7.2.	Organisational problems in refurbishing hospitals.....	138
7.3.	Development of extending the prototype	142
7.4.	Discussion.....	156
8.	Design tool: Re-implementation in game engine	158
8.1.	Introduction.....	160
8.2.	Identification and modelling of the "enriched" BIM model.....	160
8.3.	Management of information and knowledge of the "enriched"	
	Revit model	168
8.4.	Importing the model into the game engine environment.....	170
8.5.	The game engine environment - Unity3D.....	172
8.5.1.	Study and definition of an object in Unity3D	172
8.6.	Positioning and visualization of construction activities and	
	routine hospital activities in Unity3D	178
8.7.	Implementation of the simulation	182
8.8.	Definition of activities and simulation of associated risks	186
8.8.1.	Simulation of noise.....	190
8.8.2.	Simulation of vibration	198
8.8.3.	Simulation of dust.....	200
8.9.	Functionality and use of the tool.....	204
9.	Application Scenarios	212
10.	Discussion.....	216
11.	Conclusions and future developments.....	222
12.	Appendix.....	224
12.1.	Future work: Creation of hexagonal grid	226
12.2.	Publications/Pubblicazioni	232
12.3.	Ph.D. timeline	316
12.4.	Curriculum vitae.....	324
13.	Glossary/Glossario	330
14.	Index of tables and figures	336
15.	General bibliography/Bibliografia generale.....	344
16.	References/Referenze.....	345

Indice

Abstract	2
English.....	4
Italiano.....	5
Deutsch	6
Keywords	8
1. Introduzione.....	9
1.1. Problemi caratterizzanti la situazione degli ospedali e dei cantieri ospedalieri.....	11
1.2. Problematiche del processo di management di un modello progettuale multidisciplinare.....	17
2. Evoluzione dell'ospedale nel corso dei secoli	25
3. Stato dell'arte.....	51
3.1. Linee guida italiane ed internazionali	53
3.2. Approccio proattivo e matrice del rischio	61
4. Contesto.....	69
4.1. Building Information Model.....	71
4.2. Modellazione e Simulazione basata su Agenti.....	75
5. Framework concettuale.....	79
5.1. Base di Conoscenza e modello.....	81
5.2. Simulazione	85
5.3. Visualizzazione.....	89
5.4. Schema del Framework Concettuale	91
6. Prototipo del modello di Automa Cellulare (CA)*	93
6.1. Introduzione per il Prototipo in CA.....	95
6.2. Sviluppo del prototipo in CA.....	99
6.2.1. Rappresentazione dell'ambiente ospedaliero come un modello di Automa Cellulare (CA)	99
6.2.2. Localizzazione e visualizzazione delle attività di cantiere e delle attività di routine ospedaliere nel modello di CA	101
6.2.3. Impostazione della Simulazione basata su particelle nel modello di CA	105
6.2.3.1. Simulazione del rumore	107
6.2.3.2. Simulazione delle vibrazioni	109
6.2.3.3. Simulazione della polvere.....	113

6.3.	Prototipo – Caso studio	123
6.4.	Osservazioni	123
7.	Estensione del prototipo con pianificazioni di progetto	127
7.1.	Introduzione per l'estensione del prototipo	129
7.2.	Problematiche organizzative nella ristrutturazione degli ospedali.....	137
7.3.	Sviluppo dell'estensione del prototipo	141
7.4.	Discussione	155
8.	Strumento di progettazione: re-implementazione nel game engine.....	157
8.1.	Introduzione.....	159
8.2.	Individuazione e modellazione del modello BIM “arricchito”	159
8.3.	Gestione delle informazioni e delle conoscenze	
	del modello Revit “arricchito”	167
8.4.	Importazione del modello nell’ambiente di Game Engine	169
8.5.	L’ambiente Game engine - Unity3D.....	171
8.5.1.	Studio e definizione di un oggetto in Unity3D	171
8.6.	Posizionamento e visualizzazione delle attività di cantiere	
	e di quelle di routine ospedaliere in Unity3D	177
8.7.	Implementazione della simulazione.....	181
8.8.	Definizione delle attività e simulazione dei rischi associati	185
8.8.1.	Simulazione del rumore	189
8.8.2.	Simulazione delle Vibrazioni	197
8.8.3.	Simulazione della polvere.....	199
8.9.	Funzionalità ed uso dello strumento	203
9.	Scenari applicativi	211
10.	Discussione	215
11.	Conclusioni e sviluppi futuri.....	221
12.	Appendice	223
12.1.	Lavori futuri: creazione di una griglia esagonale.....	225
12.2.	Publications/Pubblicazioni	232
12.3.	Cronoprogramma della Ricerca	315
12.4.	Curriculum vitae	324
13.	Glossary/Glossario	330
14.	Indice analitico delle tabelle e delle figure	340
15.	General bibliography/Bibliografia generale	344
16.	References/Referenze	345

Abstract

English

The goal of this research is to provide a model to support the design of low-impact construction sites, in healthcare facilities through an integrated simulation focussing on the built environment, environmental phenomena that occur within it, as well as behaviours and activities of the actors involved. The presence of construction due to the ever-growing necessity to adapt and maintain existing healthcare facilities has brought on an increase in both risk and impact. This presence generates multiple repercussions to the well-being of patients and affects routine healthcare activities negatively. Thus, the focus of this work lies on reducing the impact of construction activities on daily operation.

Recent studies have demonstrated that simulation is one of the most appropriate tools for the study of complex problems, such as those in healthcare facilities. This research also shows how the use of BIM (Building Information Modeling) tools allows for geometric interference (clash) monitoring and management, in addition to simulation.

Starting from the elaboration of models developed in the BIM environment, where Revit is used as a database of geometric information and semantics relating to use, the simulation of the construction process is achieved through the use of a game engine (in this specific case Unity3D). The resulting tool can provide a simulation of both user behaviour, as well as energy and environmental phenomena.

The interaction between the "enriched" model – building and construction site – and the simulation environment, represents a possible means of risk, cost and impact control on the healthcare setting during the design stage. This is beneficial both for healthcare and construction professionals when selecting the best possible management and design solutions. In order to test the effectiveness of the approach, the proposed model was applied in a ward of the Austrian Wiener Neustadt hospital, involving real refurbishment processes.

Italiano

L'obiettivo di questa ricerca è fornire un modello per supportare la progettazione di cantieri a basso impatto, in strutture ospedaliere, attraverso una simulazione integrata incentrata sull'ambiente costruito, sui fenomeni ambientali che si verificano al suo interno, nonché i comportamenti e le attività degli attori coinvolti. La sempre più crescente esigenza di adeguare o manutenere le strutture ospedaliere esistenti ha comportato l'aumento del rischio e dell'impatto dovuto alla presenza di tali cantieri. Tale presenza genera molteplici ricadute sul benessere dei pazienti ed influisce negativamente sulle attività di routine sanitarie. Pertanto, il focus di questo lavoro sta nel ridurre l'impatto delle attività di costruzione sul funzionamento quotidiano.

Studi recenti hanno dimostrato che la simulazione è uno degli strumenti più appropriati per lo studio di problemi complessi, come quelli nelle strutture sanitarie. Questa ricerca mostra anche come l'uso degli strumenti BIM (Building Information Modelling) consente il monitoraggio e la gestione delle interferenze geometriche (clash), oltre alla simulazione.

Partendo dall'elaborazione di modelli sviluppati in ambiente BIM, utilizzando Revit come database di informazioni geometriche e di semantica relativa all'uso, la simulazione del processo costruttivo è realizzata attraverso l'utilizzo di un Game Engine, nel caso specifico Unity3D. Lo strumento risultante può fornire una simulazione del comportamento degli utenti, nonché dei fenomeni energetici e ambientali.

L'interazione tra il modello "arricchito", dell'edificio e del cantiere, e l'ambiente simulativo rappresenta un possibile mezzo di controllo dei rischi, dei costi e dell'impatto in ambito ospedaliero, durante la fase di progetto dell'intervento. Ciò è vantaggioso sia per i professionisti del settore sanitario sia per i professionisti dell'edilizia nella scelta delle migliori soluzioni gestionali e di design. Al fine di testare l'efficacia dell'approccio, il modello proposto è stato applicato su di un reparto dell'ospedale austriaco di Wiener Neustadt, coinvolgendo reali processi di ristrutturazione.

Deutsch

Ziel dieser Forschung ist es, ein simulationsgestütztes Planungsinstrument für die Baustellenplanung in Gesundheitsbauten zur Verfügung zu stellen, mit dem die Auswirkungen von Umbauarbeiten auf den täglichen Betrieb möglichst gering gehalten werden können. Dies wird durch ein integriertes Modell erreicht, welches den Gesundheitsbau, die täglichen Abläufe des Personals sowie die geplanten Umbaumaßnamen umfasst. Das Thema Baustelle in Gesundheitsbauten wurde deswegen gewählt, weil diese zum Einen durch den fortschreitenden technologischen und medizinischen Wandel allgegenwärtig sind und zum Anderen ein besonderes Risiko im klinischen Umfeld darstellen, insbesondere was Auswirkungen auf Patienten und Personal angeht. Die Reduktion letzterer Effekte bildet daher die Problemstellung der Arbeit.

Eine Vielzahl aktueller Studien zeigen, dass Simulation ein sinnvolles Instrument für die Untersuchung komplexer Probleme ist; in Gesundheitseinrichtungen wird sie insbesondere zum durchspielen und optimieren von Prozessen verschiedener Akteure benutzt (z.B. Notaufnahme). Die Forschung verknüpft diese Art der Simulation zusätzlich mit Elementen aus dem Umfeld BIM (Building Information Modeling) – beispielsweise durch Aufzeigen von geometrischen sowie auch zeitlichen Kollisionen beim Umbau.

Die Ausarbeitung dieser Arbeit erfolgte in logischen Teilstücken: Zuerst wurden Modelle ausgearbeitet, die in einer BIM-Umgebung eingebettet sind; im Detail wurde Autodesk Revit als „Datenbank“ geometrischer Informationen und Semantiken in Bezug auf Aktivitäten/Funktionen genutzt. Hernach wurden diese Informationen in eine Spiel-Engine (Unity3D) exportiert, in der eine geeignete Simulation von Benutzerverhalten erfolgt. Als ein weiteres Gebiet von Simulation wurden bauphysikalische Effekte (Verbreitung von Staub, Lärm und Vibrationen) mit einbezogen.

In dieser Hinsicht stellt die Wechselwirkung zwischen dem „angereicherten“ Modell – Gebäude plus Baustelle – und der Simulationsumgebung, ein mögliches Mittel der Risiko-, Kosten- und Wirkungskontrolle im Gesundheitswesen während der Entwurfsphase dar. Bei der Auswahl der bestmöglichen Management- und Entwurfslösungen kann es sowohl für Stakeholder im Gesundheitswesen wie auch für Baufachleute von Nutzen sein. Um dessen Wirksamkeit bzw. die Effektivität zu überprüfen wurde das vorgeschlagene Modell anhand einer prototypischen Abteilung, welche dem Landesklinikum Wiener Neustadt (Niederösterreich) nachempfunden ist, eingesetzt. Dabei wurden Daten eines realen Umbaus genutzt.

Keywords

Hospital, Construction Site, Game Engine, Gaming, Building Information Modeling, Simulation

1. Introduzione

1. Introduction

1.1. Problemi caratterizzanti la situazione degli ospedali e dei cantieri ospedalieri

La necessità di preservare e mantenere le costruzioni esistenti alla luce di nuove esigenze di costruzione è in crescita esponenziale a livello internazionale.^[1] Il settore sanitario è particolarmente colpito da questi sviluppi a causa di un'elevata dipendenza dalle tecnologie integrate negli edifici. L'Italia, ricca di un background storico, artistico ed architettonico, si sta rendendo conto di doversi porre il problema poiché sul territorio nazionale sono presenti circa 1.197 gli istituti di cura.^[2] Tali strutture presentano un serie di criticità ed infatti la maggior parte di queste avrebbe bisogno di essere adeguata con impianti sempre più evoluti. I casi più fortunati necessitano, però, di continua manutenzione che preveda l'utilizzo di nuove tecnologie.

Come esempio per la scala e l'impatto della costruzione, la Figura 1 mostra una situazione ante-operam (A) e post-operam (B). I lavori riguardano l'ospedale Edoardo Agnelli di Pinerolo (TO). La figura 2 mostra, inoltre, un esempio di lavori effettuati direttamente all'interno di un reparto e come questo può apparire prima (A) e dopo (B).

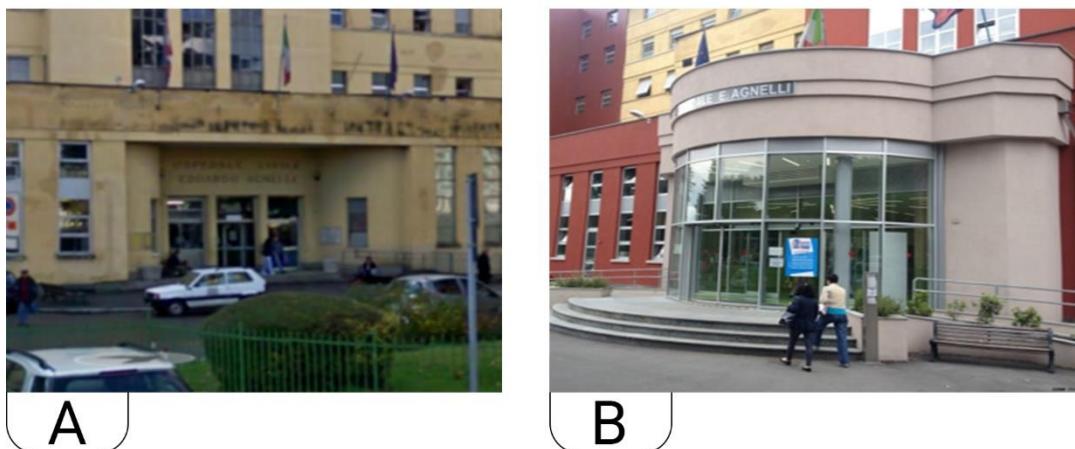


Figura 1 - Lavori di salvaguardia dell'Ospedale E. Agnelli di Pinerolo (TO), (A) Ante-operam; (B) Post-operam.
(sorgente: foto di repertorio, A^[3] e B^[4])

Naturalmente, per questa tipologia di interventi non è possibile affidarsi alla manovalanza standard, ma è previsto l'utilizzo di maestranze altamente qualificate e con elevata esperienza sul campo. I lavoratori sono caratterizzati da specifiche competenze in continuo aggiornamento, visto che dovranno agire in luoghi in cui sono presenti una serie di criticità architettoniche, ambientali e sociali. In Figura 3, sono riportati i lavori di manutenzione di un impianto nel controsoffitto (A) e l'adeguamento tecnologico di una sala per le risonanze magnetiche total-body di ultima generazione (B).

1.1. Problems characterising within the hospital setting and healthcare construction sites

The need to preserve and maintain existing buildings in the light of changing requirements in construction is growing exponentially at an international level.^[1] The healthcare sector is especially affected by these developments due to a high dependence on building-integrated technologies.

Italy, with its abundant historical, artistic and architectural background, is beginning to realise the problem as there are about 1,197 healthcare institutes nationally.^[2] Such structures present a series of critical issues, and in fact most would require adjustments or upgrades with newer generation systems.

As example for the scale and impact of construction, Figure 1 shows a before-construction situation (A) and an after-construction situation (B). The work was at Edoardo Agnelli hospital in Pinerolo (TO). Figure 2, furthermore shows an example of work implemented directly within a department, and how a hospital ward may appear before (A) and after (B).

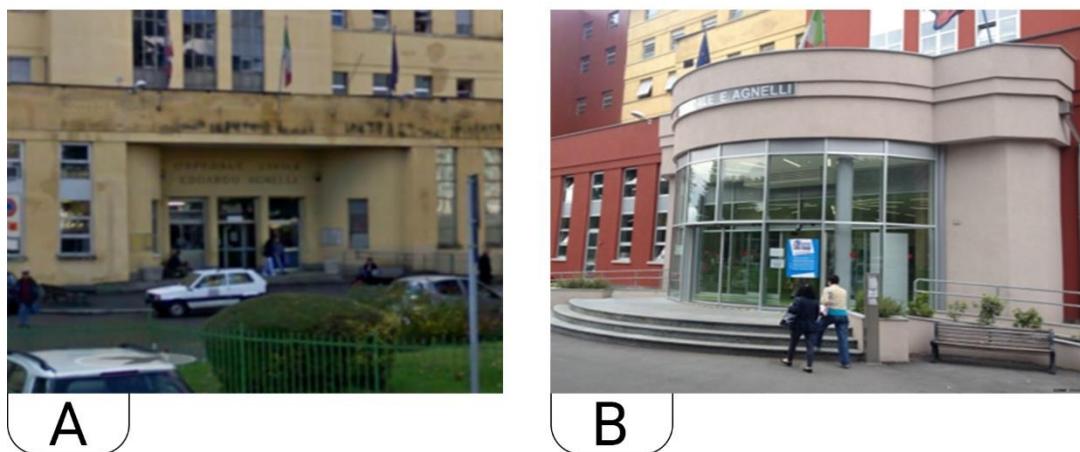


Figure 1 - Safeguarding works at E. Agnelli hospital in Pinerolo (TO), (A) before-construction and (B) after-construction situations.
(source: archive picture, A^[3] e B^[4])

Naturally, for this type of work it is not possible to count on unskilled labour. Rather, it dictates the use of a highly qualified workforce with extensive field experience. Workers are characterized by constantly updated specific competencies, since they will need to operate within locations where critical architectural, environmental and social issues are present. Figure 3. depicts maintenance work in a false ceiling (A) and the technological upgrade (to last generation total-body technology) in an MRI (Magnetic Resonance Imaging) theatre (B).

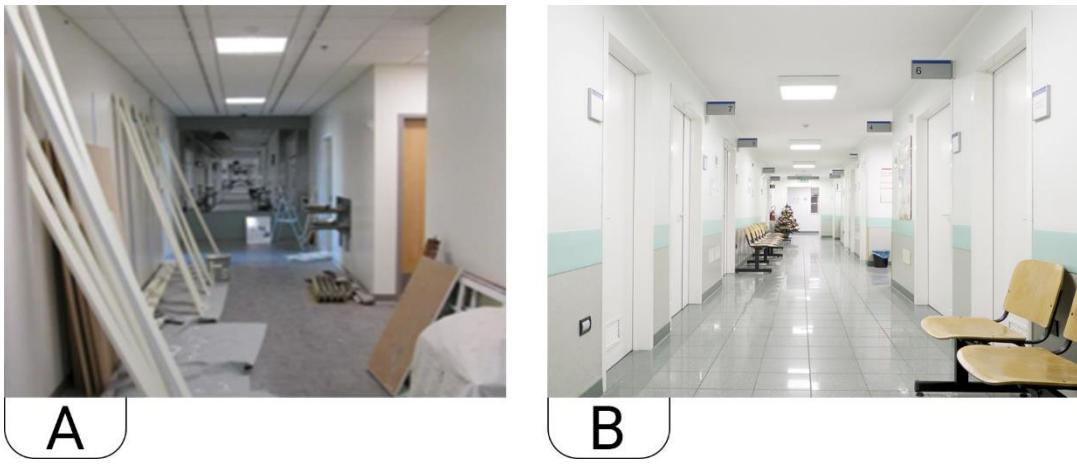


Figura 2 - Lavori di ristrutturazione all'interno di un ospedale.
(sorgente: foto di repertorio, A^[5] e B^[6])

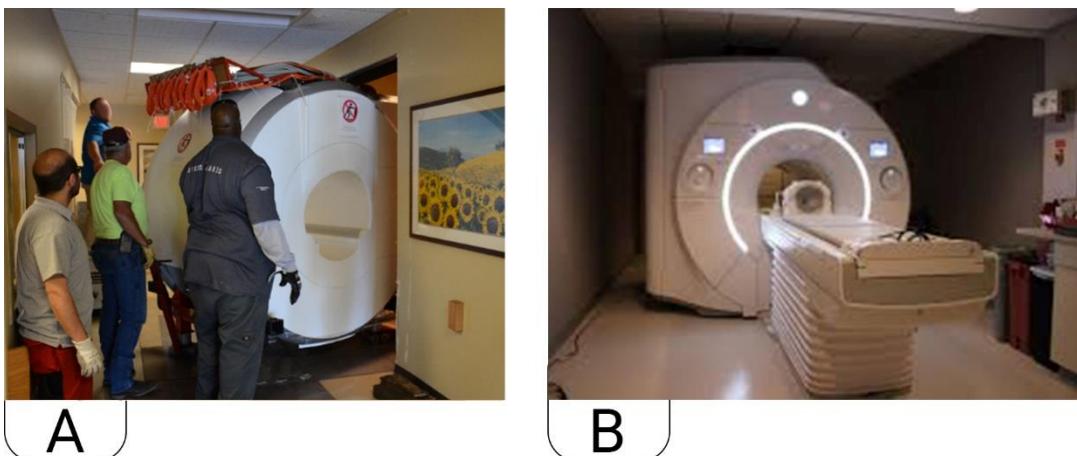


Figura 3 - Lavori per l'adeguamento tecnologico ed impiantistico.
(sorgente: foto di repertorio, A^[7] e B^[8])

Un problema rilevante da affrontare e che risulta doveroso risolvere, visto il largo utilizzo di tecnologie sempre più avanzate, è quello di prevedere l'esecuzione dei lavori. In altre parole, è necessario assicurarsi che la manutenzione regolare non interrompa le attività quotidiane dell'ospedale. Il cantiere all'interno di un ospedale, quindi, raffigura il caso emblematico di concentrazione di rischi, essendo “caratterizzato da una forte variabilità temporale di risorse, spazi fisici utilizzati ed impatti negativi sull'ambiente, che devono essere controllati e minimizzati per evitare conseguenze negative sulla popolazione esposta”. [9]

Di solito, gli addetti alla sicurezza del cantiere si occupano principalmente della salvaguardia dei lavoratori, riguardo alle prevenzione di incidenti (incendi, esposizione da agenti chimici e polveri) inerenti alla fase costruttiva. All'interno del contesto ospedaliero, è inoltre necessario salvaguardare i pazienti da fattori di rischio, quali ad esempio le polveri. A tal proposito, si rivela particolarmente rischiosa

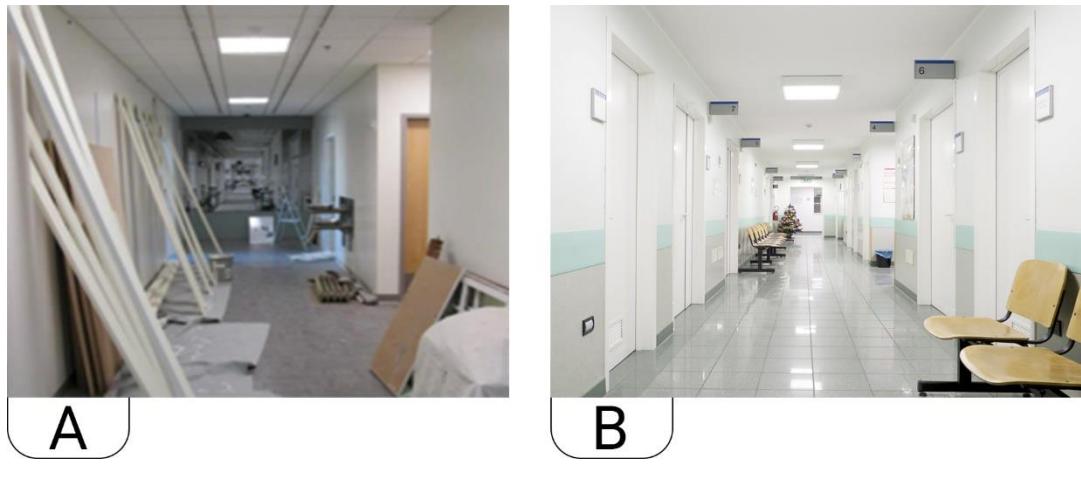


Figure 2 - Refurbishment works inside a hospital.
(source: archive picture, A^[5] e B^[6])

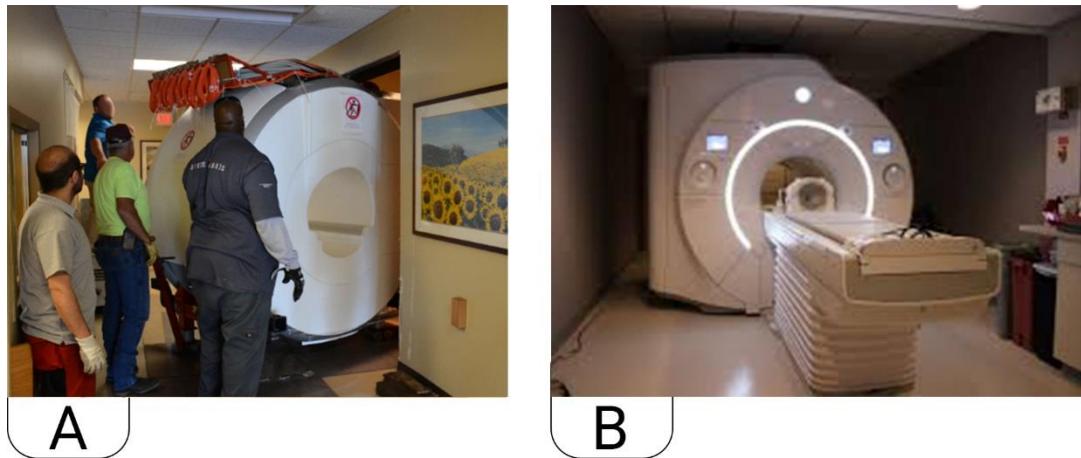


Figure 3 - New Tech upgrade installation work.
(source: archive picture, A^[7] e B^[8])

A relevant problem that must be dealt with and resolved, considering the widespread use of always advancing new technologies, is that of predicting the execution of the work. In other words, one must ensure that regular maintenance does not disrupt daily hospital activities. The construction site within a Hospital, then, represents the emblematic concentration of risks, being "characterized by a strong temporal variability of resources, usage of physical spaces and negative impact on the environment, which must be controlled and minimized to avoid negative consequences on the exposed population". [9]

Usually, those responsible for site safety will primarily handle worker health and safety, relating to prevention of incidents (fires, exposure to chemical agents and dusts) inherent to the construction phase. Within the hospital setting, it is furthermore necessary to safeguard patients from risk factors, such as for example dust particles. In this regard, the presence of immunosuppressed and vulnerable patients becomes

la presenza di pazienti immunodepressi, suscettibili quindi ad infezioni generate da agenti patogeni “facoltativi”, veicolati dalle polveri.

In fase progettuale, si deve tenere conto dell’impatto che un cantiere può produrre all’interno di un ospedale in attività, determinando molteplici ricadute e rischi, le quali devono essere gestite nella quotidianità e nell’emergenza, in funzione delle mutate condizioni dell’edificio. La figura 4 mostra un operaio che utilizza l’ingresso del pronto soccorso per raggiungere il cantiere trasportando materiale all’interno dell’ospedale, esempio di rischio operativo sia per i pazienti sia per i lavoratori.



Figura 4 - Ricadute operative.
(sorgente: foto di repertorio [10])

Durante lo studio della cantierizzazione, si dovrà quindi prevedere una organizzazione capillare che tenga conto non solo delle problematiche che ricadono sulle attività svolte all’interno dell’ospedale ma anche sulle eventuali situazioni di emergenza che si potranno venire a creare per l’intera durata del cantiere (ad es. evacuazioni, epidemie) sia da parte degli operatori sanitari sia da parte di quelli di cantiere.

La durata di un cantiere, normalmente, è determinata dai costi e dalle scelte progettuali effettuate, quando si tratta dell’ambito ospedaliero subentrano altre dinamiche importanti. Infatti, si deve anche tenere conto delle problematiche derivanti dall’organizzazione e dalla gestione per il mantenimento della funzionalità delle attività sanitarie e del benessere dei pazienti. Fino ad oggi, infatti, i lavori di ristrutturazione all’interno di una struttura sanitaria hanno comportato, nella maggior parte dei casi, la chiusura di un reparto o dell’intero ospedale.

particularly risky due to their susceptibility to infection generated by "opportunistic" pathogens, spread by dusts.

In the design phase, the impact a construction site generates on an operational healthcare structure must be taken into consideration, determining various repercussions and risks which must be dealt with in both daily activity and emergency, factoring in changing conditions of the building accommodating the construction site. Figure 4 portrays a construction worker who uses the Emergency Room entrance to reach the site whilst carrying material into the hospital, as example for operational risk both to patients and workers.



Figure 4 - Operational risk.
(source: archive picture [10])

During the planning of the site, a detailed organisation system that considers problems affecting tasks conducted inside the Healthcare facility but also during possible emergency situations that may occur anytime over the course of the site's continuing activity (e.g. evacuations, epidemics) – in regard to both the construction team and the healthcare staff – is to be put into place.

Construction site duration is usually determined by cost and design, but within the healthcare sector other important dynamics enter the equation, as challenges in organisation and continuing operation must be taken into account. This involves maintaining functionality of healthcare activities and patient wellbeing at the same time. Until today, renovation work within a healthcare structure entails, in the majority of cases, the shutting down of a department or the entire hospital.