

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile



Tesi di Laurea Magistrale

**L'utilizzo dell'esoscheletro per il retrofit
integrato sostenibile nell'adeguamento
sismico di un edificio esistente**

Relatore:

Prof. Ing. Giuseppe Andrea Ferro

Correlatori:

Arch. Luciana Restuccia

Ing. Esperanza Fernandez Batuecas

Ing. Lucrezia Martelli

Candidato:

Marco Maninchedda

Dicembre 2019

“Strategie di prevenzione più efficaci farebbero non solo risparmiare decine di miliardi di dollari ma salverebbero decine di migliaia di vite. Costruire una cultura di prevenzione non è facile. Mentre i costi della prevenzione devono essere pagati nel presente, i suoi benefici si avvertono in un futuro distante. Per di più, i benefici non sono tangibili: sono i disastri non avvenuti!”

Kofi Annan

Sommario

Il presente lavoro di tesi focalizza l'attenzione sull'analisi strutturale di un edificio multipiano, realizzato a Torino, che ha già raggiunto e superato la vita nominale di progetto di 50 anni. Lo scopo principale è quello di valutare l'impatto ambientale ed economico degli interventi di miglioramento e/o adeguamento sismico sugli edifici esistenti.

La strategia progettuale ad oggi più impiegata è quella che percorre la strada della demolizione e costruzione ex novo ma, in una società in cui le politiche di sostenibilità stanno divenendo sempre più rilevanti, tale operazione risulta molto onerosa da un punto di vista ambientale.

A partire da queste condizioni, si delinea un nuovo scenario che prevede la riqualificazione della struttura esistente con l'impiego di una struttura autoportante esterna capace di farsi carico delle azioni orizzontali, chiamata "esoscheletro". L'impiego di tale strategia progettuale permette non solo di adeguare sismicamente l'edificio, ma anche di ridurre al minimo lo spreco di materie prime e di azzerare la produzione di macerie edili.

La metodologia impiegata per l'esecuzione dello studio è la LCA (*Life Cycle Assessment*), basata sulle norme UNI EN ISO 14040 e 14044. In tale analisi si valutano i quantitativi di carichi ambientali associati a tutte le fasi lavorative dei due scenari considerando i vari consumi energetici e di materiali oltre ai vari rifiuti prodotti e rilasciati nell'ambiente. Il modello impiegato, implementato sul software SimaPro 8.4, è l'ILCD Midpoint e i risultati da esso prodotti sono classificati non su un'unica, ma su molteplici categorie di impatto. Ogni categoria esprime un possibile danno all'ambiente o alla salute umana e tramite queste si possono identificare gli impatti associati alle varie fasi lavorative.

Dall'analisi dei risultati si evince come il secondo scenario risulti più conforme ad uno "sviluppo sostenibile" e pertanto si è approfondita, nel dettaglio, la risposta strutturale dell'edificio riqualificato. Tramite il software Robot è stato possibile modellare l'esoscheletro, identificandone la configurazione strutturale più efficiente, e verificare la resistenza all'azione sismica dell'edificio. La soluzione adottata è quella di una struttura a *pseudo-diagrid*, ottenuta andando ad aggiungere ad elementi inclinati dei pilastri di rinforzo d'acciaio.

Nel seguente studio non solo si vuole dare una "seconda vita" ad un edificio esistente, aumentandone l'efficienza termica ed energetica e riducendo al minimo l'impatto ambientale, ma anche evitare il ricollocamento degli inquilini durante le fasi lavorative. L'operazione di realizzazione dell'esoscheletro risulta essere infatti poco invasiva.

Abstract

The present thesis focuses attention on the structural analysis of a multi-storey building, built in Turin, which has already reached and exceeded the nominal project life of 50 years. The main purpose is to evaluate the environmental and economic impact of seismic improvement and / or adaptation interventions on existing buildings.

The most commonly used design strategy today is the one that takes the road of demolition and construction but, in a society where sustainability policies are becoming increasingly relevant, this operation, from an environmental point of view, is very onerous.

Starting from these conditions, a new scenario emerges that foresees the redevelopment of the existing structure with the use of an external self-supporting structure capable of taking on horizontal actions, called "exoskeleton". The use of this design strategy allows not only to seismically adapt the building, but also to minimize the waste of raw materials and to eliminate the production of building rubble.

The methodology used for the execution of the study is the LCA (Life Cycle Assessment), based on the standards UNI EN ISO 14040 and 14044. In this analysis the quantities of environmental loads associated to all working phases of the two scenarios are evaluated considering energy and material consumptions in addition to the waste released into the environment. The model used, implemented on the software SimaPro 8.4, is the ILCD Midpoint. The results obtained are classified into multiple impact categories. Each category expresses a possible damage to environment or human health. By analysing the impact categories, it is possible to identify the contributions to the environmental impacts that are associated with the different work phases.

The analysis of the results shows that the second scenario is more in line with a "sustainable development" and therefore the structural response of the redeveloped building was examined in detail. Through the software Robot it was possible to model the exoskeleton, identifying the most efficient structural configuration, and verify the resistance to the seismic action of the building. The solution adopted is that of a pseudo-diagrid structure, obtained by adding steel-reinforced pillars to inclined elements.

In the following study we want not only to give a "second life" to an existing building, increasing its thermal and energy efficiency and minimizing the environmental impact, but also avoiding the relocation of tenants during the working phases. The operation of making the exoskeleton is in fact not very invasive.

Résumé

Cette thèse met l'accent sur l'analyse structurelle d'un bâtiment à plusieurs étages construit à Turin, qui a déjà atteint et dépassé la durée de vie nominale du projet de 50 ans. L'objectif principal est d'évaluer l'impact environnemental et économique des interventions d'amélioration et/ou d'adaptation sismiques sur les bâtiments existants.

La stratégie de conception la plus couramment utilisée aujourd'hui est celle qui prend la route de la démolition et de la reconstruction à partir de zéro. Cependant, dans une société où les politiques de durabilité deviennent de plus en plus importantes, cette opération, d'un point de vue de l'environnement, a de nombreuses conséquences. À partir de ces conditions, un nouveau scénario se dessine, prévoyant le réaménagement de la structure existante grâce à l'utilisation d'une structure externe autonome capable de mener des actions horizontales, appelée « exosquelette ». L'utilisation de cette stratégie permet non seulement d'adapter le bâtiment aux normes sismiques, mais également de minimiser le gaspillage de matières premières et d'éliminer la production de gravats.

La méthodologie utilisée pour l'exécution de l'étude est l'analyse du cycle de vie, basée sur les normes UNI EN ISO 14040 et 14044. Dans cette analyse sont évaluées les quantités de charges environnementales associées à toutes les phases de travail des deux scénarios en tenant compte de la consommation d'énergie et de matériaux ainsi que des déchets produits et rejetés dans l'environnement. Le modèle utilisé, que l'on retrouve dans le logiciel SimaPro 8.4, est l'ILCD Midpoint et les résultats produits par celui-ci sont classés non pas sur une seule mais sur plusieurs catégories d'impacts. Chaque catégorie exprime un risque d'atteinte à l'environnement ou à la santé humaine et permet d'identifier les impacts associés aux différentes phases de travail.

L'analyse des résultats montre que le deuxième scénario correspond davantage à un "développement durable" et que, par conséquent, la réponse structurelle du bâtiment réaménagé a été examinée plus en détail. Grâce au logiciel Robot, il était possible de modéliser l'exosquelette en identifiant la configuration structurelle la plus efficace et en vérifiant la résistance du bâtiment vis-à-vis des efforts sismiques. La solution retenue est celle d'une structure pseudo-diagrid, obtenue en ajoutant des poteaux renforcés d'aciers aux éléments inclinés.

Dans l'étude suivante, nous voulons non seulement donner une "seconde vie" à un bâtiment existant (en augmentant son efficacité thermique et énergétique et en minimisant son impact sur l'environnement) mais aussi éviter le déplacement de locataires pendant les phases de travail. L'opération de fabrication de l'exosquelette n'est en fait pas très envahissante.

Indice

Sommario	III
Abstract 	IV
Résumé 	V
Indice	VI
Indice delle figure	IX
Indice delle tabelle	XII
Indice degli acronimi	XIV
Capitolo 1: Introduzione	1
Capitolo 2: Life Cycle Assessment	3
2.1 Definizione del ciclo vita	3
2.2 Origine e sviluppo della metodologia LCA	5
2.3 Fasi della valutazione del ciclo di vita	6
2.3.1 Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione.....	6
2.3.2 Analisi d'inventario.....	10
2.3.3 Valutazione dell'impatto del ciclo di vita.....	11
2.3.4 Interpretazione dei risultati del ciclo di vita.....	13
2.4 Presentazione dei risultati	14
2.5 Riesame critico	14
2.6 Vantaggi e limiti della LCA	15
2.7 Applicazione della LCA nell'edilizia	16
2.7.1 Il patrimonio edilizio esistente.....	18
2.7.2 Edilizia e ambiente.....	19
2.7.3 Direttiva europea 2008/98/CE	20
2.8 Obiettivo e campo di applicazione	22
Capitolo 3: Life Cycle Inventory Analysis (LCI)	23
3.1 Edificio oggetto dello studio	24

3.1.1	Piano INA-Casa.....	25
3.1.2	Quartiere in corso Sebastopoli.....	26
3.1.3	Materiali costituenti l'edificio.....	28
3.2	Software impiegato: SimaPro 8.4.....	31
3.3	Parco macchine.....	32
3.3.1	Scenario I.....	32
3.3.2	Scenario II.....	35
3.4	Modalità di riciclo del materiale.....	37
3.5	Scenario I.....	45
3.6	Scenario I Consequential.....	47
3.7	Scenario II.....	50
3.8	Scenario II Consequential.....	52
Capitolo 4: Life Cycle Impact Assessment (LCIA).....		55
4.1	Metodo ILCD Midpoint.....	55
4.2	Impatti ambientali del ciclo vita della demolizione e ricostruzione - Scenario I/Scenario I Consequential.....	64
4.3	Impatti ambientali del ciclo vita della demolizione e ricostruzione - Scenario II/Scenario II Consequential.....	79
4.4	Confronto risultati.....	86
Capitolo 5: L'uso dell'esoscheletro nell'adeguamento sismico.....		89
5.1	Soluzioni progettuali secondo normativa.....	89
5.2	Aspetti normativi.....	91
5.3	Azione sismica.....	94
5.4	Potenzialità del sistema esoscheletro.....	97
5.4.1	Tipologia a Tapered Braces Tubes.....	99
5.4.2	Tipologia a Diagrid.....	101
5.4.3	Tipologia di esoscheletro adottata.....	103
5.5	Il comportamento teorico.....	105
5.6	Dati di input.....	109

5.6.1	Analisi dei carichi	109
5.6.2	Parametri sismici.....	110
5.6.3	Combinazione delle azioni.....	111
5.6.4	Analisi dinamica lineare	112
Capitolo 6: Analisi strutturale.....		113
6.1	Struttura esistente	115
6.2	Struttura con pseudo-diagrid.....	118
6.3	Analisi dei risultati.....	121
Capitolo 7: Conclusioni e sviluppi futuri		124
7.1	Sviluppi futuri.....	126
Bibliografia.....		128
Ringraziamenti.....		133

Indice delle figure

Figura 2.1: Schema del ciclo di vita di un prodotto [3]	4
Figura 2.2: Fasi dello studio del ciclo di vita	6
Figura 2.3: Definizione del sistema prodotto	7
Figura 2.4: Schema diagramma di flusso	9
Figura 3.1: Geolocalizzazione su scala nazionale e cittadina dell'edificio.....	24
Figura 3.2: Foto dell'edificio oggetto dello studio.....	24
Figura 3.3: Posizionamento dei vari edifici come previsto nel progetto (Fonte: archivio Dolza)	26
Figura 3.4: Schizzo prospettico dell'edificio (Fonte: fondi Eugenio e Carlo Mollino, Politecnico di Torino)	26
Figura 3.5: Vista frontale dell'edificio (Fonte: archivio Dolza).....	27
Figura 3.6: Veduta del complesso di edifici (Fonte: fondi Eugenio e Carlo Mollino, Politecnico di Torino)	27
Figura 3.7: Planimetrie strutturali 1° piano (Fonte: Archivio di Stato del Comune di Torino)	28
Figura 3.8: Disposizione armature nelle travi (Fonte: Archivio di Stato del Comune di Torino)	28
Figura 3.9: Schema copertura (Fonte: Archivio di Stato del Comune di Torino).....	29
Figura 3.10: Rappresentazione grafica dell'edificio in esame.....	29
Figura 3.11: Percentuale di produzione rifiuti speciali nei principali settori economici	37
Figura 3.12: Percentuale di produzione rifiuti speciali non pericolosi nei principali settori economici	38
Figura 3.13: Percentuale di produzione rifiuti speciali pericolosi nei principali settori economici	38
Figura 3.14: Fasi del processo Heating and Rubbing [25].....	44
Figura 3.15: Diagramma di flusso Scenario I	45
Figura 3.16: Diagramma di flusso Scenario I Consequential.....	47
Figura 3.17: Diagramma di flusso Scenario II.....	50
Figura 3.18: Diagramma di flusso Scenario II Consequential	52
Figura 4.1: Categorie d'impatto a livello di midpoint ed endpoint [30].....	56
Figura 4.2: Impatti Scenario I.....	64
Figura 4.3: Impatti Scenario I Consequential	65

Figura 4.4: Climate change Scenario I.....	68
Figura 4.5: Climate change Scenario I Consequential	69
Figura 4.6: Ozone depletion Scenario I	71
Figura 4.7: Ozone depletion Scenario I Consequential	71
Figura 4.8: Human toxicity, non cancer effects, Scenario I.....	72
Figura 4.9: Human toxicity, non cancer effects, Scenario I Consequential	72
Figura 4.10: Human toxicity, cancer effects, Scenario I.....	73
Figura 4.11: Human toxicity, cancer effects, Scenario I Consequential.....	73
Figura 4.12: Particulate matter Scenario I.....	74
Figura 4.13: Particulate matter Scenario I Consequential.....	74
Figura 4.14: Freshwater eutrophication Scenario I.....	75
Figura 4.15: Freshwater eutrophication Scenario I Consequential.....	75
Figura 4.16: Land use Scenario I.....	76
Figura 4.17: Land use Scenario I Consequential.....	77
Figura 4.18: Mineral, fossil and energy resource depletion Scenario I.....	78
Figura 4.19: Mineral, fossil and energy resource depletion Scenario I Consequential.....	78
Figura 4.20: Impatti Scenario II Consequential	79
Figura 4.21: Climate change Scenario II Consequential	81
Figura 4.22: Ozone depletion Scenario II Consequential.....	82
Figura 4.23: Human toxicity, non-cancer effects, Scenario II Consequential.....	82
Figura 4.24: Human toxicity, cancer effects, Scenario II Consequential	83
Figura 4.25: Particulate matter Scenario II Consequential	83
Figura 4.26: Freshwater eutrophication Scenario II Consequential	84
Figura 4.27: Land use Scenario II Consequential	84
Figura 4.28: Mineral, fossil and energy resource depletion Scenario II Consequential	85
Figura 4.29: Confronto degli impatti dei quattro scenari per tutte le categorie analizzate....	87
Figura 5.1: Mappa europea della pericolosità sismica [9].....	95
Figura 5.2: Classi di vulnerabilità sismica [9].....	96
Figura 5.3: Vantaggi derivanti dalla riqualificazione [8].....	97
Figura 5.4: Soluzioni per un edificio esistente [8]	98
Figura 5.5: Veduta del John Hancock Center [49]	99
Figura 5.6: Schema a tubi rinforzati [50]	100
Figura 5.7: Veduta del Swiss Re Building [51]	101
Figura 5.8: Confronto tra schema a tubi rinforzati e diagrid [52].....	102
Figura 5.9: Schema a diagrid [50]	102

Figura 5.10: Rappresentazione grafica dell'edificio riqualificato con esoscheletro	103
Figura 5.11: Vista frontale dell'edificio con esoscheletro.....	104
Figura 5.12: Vista laterale dell'edificio con esoscheletro.....	104
Figura 5.13: Modello della struttura isolata.....	105
Figura 5.14: Modello della struttura controllata [53]	106
Figura 5.15: Variazione indice prestazionale per gli spostamenti al variare di α e μ [53]....	108
Figura 5.16: Spettro di risposta alle coordinate di riferimento per i vari stati limite.....	111
Figura 6.1: Modello strutturale dell'edificio esistente	113
Figura 6.2: Modello strutturale dell'edificio con esoscheletro	114
Figura 6.3: Caratteristiche geometriche trave di fondazione.....	114
Figura 6.4: Primo modo di vibrare (traslazione lungo y)	116
Figura 6.5: Secondo modo di vibrare (traslazione lungo x).....	116
Figura 6.6: Terzo modo di vibrare (torsione).....	116
Figura 6.7: Spostamenti di piano allo SLD – Struttura originaria.....	117
Figura 6.8: Spostamenti di piano allo SLV – Struttura originaria.....	117
Figura 6.9: Primo modo di vibrare (traslazione lungo y)	119
Figura 6.10: Secondo modo di vibrare (traslazione lungo x)	119
Figura 6.11: Terzo modo di vibrare (torsione).....	119
Figura 6.12: Spostamenti di piano allo SLD - Esoscheletro.....	120
Figura 6.13: Spostamenti di piano allo SLV - Esoscheletro.....	120
Figura 6.14: Confronto degli spostamenti - SLD.....	121
Figura 6.15: Confronto degli spostamenti - SLV.....	122
Figura 6.16: Drift di piano normalizzati	122
Figura 7.1: Confronto degli impatti dei quattro scenari per tutte le categorie analizzate	124

Indice delle tabelle

Tabella 2.1: Categorie d'impatto.....	12
Tabella 3.1: Volumi e pesi dei materiali costituenti la struttura originale	30
Tabella 3.2: Mezzi impiegati nell'analisi.....	32
Tabella 3.3: Caratteristiche mezzi da trasporto per la demolizione Scenario I	33
Tabella 3.4: Caratteristiche mezzi da demolizione Scenario I.....	33
Tabella 3.5: Caratteristiche mezzi da trasporto per la costruzione Scenario I	34
Tabella 3.6: Caratteristiche gru Scenario I.....	34
Tabella 3.7: Caratteristiche mezzi da costruzione Scenario I	34
Tabella 3.8: Caratteristiche mezzi da trasporto per la demolizione Scenario II.....	35
Tabella 3.9: Caratteristiche mezzi da demolizione Scenario II.....	35
Tabella 3.10: Caratteristiche mezzi da trasporto per la costruzione Scenario II	36
Tabella 3.11: Caratteristiche gru Scenario II	36
Tabella 3.12: Caratteristiche mezzi da costruzione Scenario II	36
Tabella 3.13: Percentuali di riciclaggio	40
Tabella 3.14: Massa e consumi energetici per riciclo dell'acciaio	41
Tabella 3.15: Massa e consumi energetici per riciclo del vetro.....	42
Tabella 3.16: Massa e consumi energetici per riciclo dei materiali ceramici	42
Tabella 3.17: Massa e consumi energetici per riciclo del legno	43
Tabella 3.18: Percentuale di riuso del calcestruzzo secondo la NTC 2018.....	43
Tabella 3.19: Massa e consumi energetici per riciclo del calcestruzzo	44
Tabella 3.20: Quantitativo di materiale alla discarica Scenario I	46
Tabella 3.21: Quantitativo di materiale necessario per una nuova struttura Scenario I	46
Tabella 3.22: Quantitativo e percentuale di materiale riciclato Scenario I.....	48
Tabella 3.23: Reimpiego del materiale riciclato Scenario I.....	48
Tabella 3.24: Quantitativo di materiale di nuova produzione Scenario I.....	49
Tabella 3.25: Quantitativo di materiale alla discarica Scenario II.....	51
Tabella 3.26: Quantitativo di materiale necessario per l'esoscheletro Scenario II	51
Tabella 3.27: Quantitativo di materiale alla discarica Scenario II.....	53
Tabella 3.28: Reimpiego del materiale riciclato Scenario II	53
Tabella 3.29: Reimpiego del materiale riciclato Scenario II	54
Tabella 4.1: Modelli, indicatori e livelli di raccomandazione per le categorie d'impatto [29]	57
Tabella 4.2: Impatti materiali ed operazioni per ogni categoria – Scenario I.....	66

Tabella 4.3: Impatti dei materiali ed operazioni per ogni categoria – Scenario I Consequential a.....	67
Tabella 4.4: Impatti dei materiali ed operazioni per ogni categoria – Scenario I Consequential b.....	68
Tabella 4.5: Impatti dei materiali ed operazioni per ogni categoria – Scenario II Consequential a.....	80
Tabella 4.6: Impatti dei materiali ed operazioni per ogni categoria – Scenario II Consequential b.....	81
Tabella 4.7: Confronto degli impatti dei quattro scenari per tutte le categorie analizzate.....	86
Tabella 5.1: Tabella probabilità di superamento del periodo di riferimento per i vari stati limite [28]	91
Tabella 5.2: Parametri sismici per i vari stati limite.....	111
Tabella 5.3: Combinazioni dell’azione sismica.....	111
Tabella 6.1: Risultati analisi modale	115
Tabella 6.2: Spostamenti in direzione x e y per i due stati limite – Struttura originaria	117
Tabella 6.3: Risultati analisi modale	118
Tabella 6.4: Spostamenti in direzione x e y per i due stati limite - Esoscheletro.....	120
Tabella 6.5: Spostamenti in direzione x e y per i due stati limite - Esoscheletro.....	123

Indice degli acronimi

ANAS - Azienda Nazionale Autonoma delle Strade

AE - Accumulated Exceedance

BTM - Building Typology Matrix

CE - Conformità Europea

CER - Codici Europei dei Rifiuti

CFC - Clorofluorocarburi

CFC-11 - Triclorofluorometano

CO₂ - Anidride carbonica

CQC - Combinazione Quadratica Completa

CTU - Comparative Toxic Unit

DALY - Disability Adjusted Life Years

D.lgs. - Decreto Legislativo

D.M. - Decreto Ministeriale

ECTP - European Construction Technology Platform

EMS - European Macroseismic Scale

EPA - Environmental Protection Agency

GWP - Global Warming Potential

HDI - Human Development Indexes

HRM - Heating and Rubbing

IARC - International Agency for Research on Cancer

ILCD - International Reference Life Cycle Data System

INA - Istituto Nazionale delle Assicurazioni

IPCC - International Panel on Climate Change

IRPEF - Imposta sul Reddito delle Persone Fisiche

ISO - International Standard Organization

ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale

JRC - Joint Research Centre

LCA - Life Cycle Assessment

LCC - Life Cycle Cost

LCI - Life Cycle Inventory

LCIA - Life Cycle Impact Assessment

LCT - Life Cycle Thinking

NCT - Norma Tecnica delle Costruzioni 2018
NH₃ - Ammoniaca
NO_x - Ossidi di azoto
OCR - Ordinary Recycling Process
ODP - Ozone Depletion Potential
ODS - Ozone Depleting Substances
NMVOCs - Non-Methane Volatile Organic Compounds
PGA - Peak Ground Acceleration
PI - Performance Index
PM - Particulate Matters
POCP - Photochemical Ozone Creation Potential
RC - Reinforced Concrete
RFI - Rete Ferroviaria Italiana
SETAC - Society of Environmental Toxicology and Chemistry
SLC - Stato Limite di prevenzione del Collasso
SLD - Stato Limite di Danno
SLE - Stati Limite di Esercizio
SLO - Stato Limite di Operatività
SLU - Stato Limite Ultimo
SLV - Stato Limite di Salvaguardia della Vita
SNPA - Sistema Nazionale a rete per la Protezione dell'Ambiente
SO₂ - Anidride solforosa
S.p.A. - Società per Azioni
SPC - Sustainable Consumption and Production
UNEP - United Nations Environmental Programme
UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione
UV - Raggi ultravioletti
WHO - World Health Organization
WMO - World Meteorological Organization

Capitolo 1

Introduzione

L'Italia, alla luce degli ultimi eventi occorsi, risulta sempre più un Paese fragile, caratterizzato da un eterogeneo e poco mantenuto patrimonio edilizio ed infrastrutturale. Le strutture in cemento armato, realizzate nella seconda metà del ventesimo secolo, rappresentano circa il 50% di tale patrimonio e, nella maggior parte dei casi, molti edifici sono prossimi al termine della loro vita nominale di progetto (stimata in 50 anni). Le problematiche legate alle carenze strutturali di tali edifici vengono spesso messe in secondo piano, nonostante in alcuni casi siano gravi ed evidenti, e sono perlopiù legate alla incapacità di resistere ad eventi di natura sismica. Oltre al deficit legato alle prestazioni strutturali, è da segnalare che tali edifici sono inoltre caratterizzati da una scarsa efficienza energetica, collocando il settore edile tra le principali fonti di emissioni di CO₂.

Nel presente lavoro di tesi, l'attenzione si rivolge alla riqualificazione del patrimonio edilizio esistente (principalmente edilizia popolare) con il duplice obiettivo di adottare soluzioni progettuali altamente performanti in campo strutturale ed energetico e di ridurre gli impatti ambientali.

In generale, le linee di azioni progettuali sulle costruzioni esistenti si sviluppano secondo due diversi scenari: 1) interventi di demolizione e ricostruzione; 2) interventi di miglioramento e/o adeguamento sismico.

La prima soluzione, molto impattante, non è percorribile su larga scala a causa dei problemi legati al consumo di materie prime e smaltimento delle macerie. La seconda soluzione è invece sostenibile e nel caso specifico è stata ideata una soluzione progettuale denominata "esoscheletro esterno", una struttura autoportante in acciaio che permette di rinforzare l'edificio sia da un punto di vista statico che sismico. Al contempo, da un punto di vista ambientale, l'esoscheletro permette di rispettare le indicazioni direttiva europea 2008/98/CE, la quale impone che entro il 2020 si abbia un riciclo delle macerie prodotte almeno pari al 70% in peso.

Per poter affrontare una problematica complessa come quella del retrofit strutturale sostenibile si è deciso di partire dall'approfondimento delle conoscenze in letteratura per poi sviluppare l'argomento in questione. Pertanto, il lavoro di tesi è stato strutturato in due macro parti. Nella prima, sono stati valutati i quantitativi di carichi ambientali associati a tutte le fasi lavorative per i due diversi scenari sopradetti e, applicando la metodologia del *Life Cycle Assessment*, è stata individuata la configurazione più sostenibile. A partire da tali risultati dell'analisi LCA, nella seconda parte del lavoro, si è approfondita la risposta strutturale dell'edificio, tramite l'impiego della soluzione progettuale "esoscheletro".

Pertanto la tesi risulta così suddivisa:

- il Capitolo 2 riassume tutti gli aspetti fondanti un'analisi LCA, spiegando le modalità con le quali questa viene sviluppata e la sua applicazione nell'edilizia; viene inoltre motivato l'obiettivo ed il campo di applicazione dello studio;
- il Capitolo 3 si concentra sull'analisi d'inventario, identificando tutti i materiali coinvolti nelle varie fasi lavorative ed analizzando il loro impiego nei differenti scenari; vengono inoltre mostrate le modalità di riciclo delle macerie e l'energia necessaria al loro recupero;
- il Capitolo 4, a partire dalla metodologia impiegata (ILCD Midpoint), cataloga tutte le categorie d'impatto valutate durante lo studio LCA e spiega come queste si ripartiscano per gli scenari analizzati. Si interpretano inoltre i risultati ottenuti spiegando gli impatti associati ad ogni materiale o fase lavorativa; vengono inoltre confrontati i danni complessivi per ogni scenario, permettendo di identificare quello meno impattante;
- il Capitolo 5 introduce il concetto di vulnerabilità sismica degli edifici e spiega l'origine della soluzione a *pseudo-diagrid* adottata per adeguare un edificio esistente con struttura portante in cemento armato, approfondendo la modellazione strutturale;
- il Capitolo 6 riassume i risultati dell'analisi strutturale ottenuti tramite il software Robot, mostrando l'efficienza della soluzione "esoscheletro esterno";
- il Capitolo 7 presenta, in conclusione, le scelte effettuate ed i risultati promettenti della soluzione progettuale "esoscheletro esterno"; vengono inoltre introdotti i possibili sviluppi futuri.

Tutte le immagini relative alle tavole originarie del progetto strutturale ed architettonico dell'edificio sono state fornite dal relatore e/o reperite presso gli archivi comunali.

Capitolo 2

Life Cycle Assessment

2.1 Definizione del ciclo vita

Negli ultimi anni, visto il progressivo deterioramento degli ecosistemi, si sta rafforzando in Europa la domanda di una migliore qualità ambientale insieme alla richiesta di una maggiore efficienza dei servizi e degli impianti tecnologici.

Lo scopo è far sì che il progresso economico e sociale sia accompagnato da uno sviluppo ambientale in una maniera tale per cui si possa parlare di “sviluppo sostenibile”.

L'analisi LCA (*Life Cycle Assessment*), negli ultimi anni, ha trovato quindi ampio utilizzo nelle aziende che vogliono tenere sotto controllo, da un punto di vista ambientale, i processi legati ai propri prodotti. I seguenti prodotti presenteranno però un impatto ambientale che non si esaurirà nel solo atto della loro produzione, ma, come vedremo nel seguente lavoro, si estenderanno anche alle modalità con le quali questi saranno impiegati e smaltiti. Tutto questo è governato da politiche europee di sostenibilità ambientale che definiscono strategie volte al miglioramento dei risultati sul campo ambientale.

La ISO (*International Standard Organization*) è un'organizzazione internazionale, rappresentata in Italia da UNI (Ente Nazionale Italiano di Unificazione), che ha provveduto a sviluppare norme standardizzate in materia di gestione ambientale. Le norme sviluppate appartengono alla serie ISO 14040:2006 e alla serie ISO 14044:2018 che definiscono la Valutazione del Ciclo di Vita (LCA) di un prodotto [1][2]. Inoltre, l'*International reference Life Cycle Data system handbook* (ILCD), redatto in accordo con le suddette norme ISO, è costituito da una serie di manuali che rappresentano una guida tecnica e un supporto per lo svolgimento di analisi del ciclo di vita.

Il metodo LCA è oggi una procedura standardizzata che tende a determinare il costo ambientale delle attività umane, quantificando quanto un certo prodotto (o processo di attività) impatti sull'ambiente. L'idea nuova rispetto al passato è quella di considerare un prodotto come un insieme di operazioni, di flussi in input e output di materiali e forme di energia; questi flussi andranno poi a scandire tutti gli step del suo ciclo di vita, dalla progettazione sino alla dismissione e al recupero o smaltimento finale. La definizione della procedura LCA può essere quindi espressa come un procedimento oggettivo sulla valutazione dei carichi energetici e ambientali relativi a un singolo processo o a un'attività valutando non solo l'energia impiegata per produrli, ma anche i materiali impiegati e i rifiuti rilasciati nell'ambiente. La valutazione include, all'intero del ciclo di vita del processo o attività, una serie di attività differenti: l'estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione,

il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale come mostrato in *Figura 2.1*.

I processi in gioco sono differenti e i risultati dell'analisi saranno tanto più precisi ed attendibili quanto maggiori saranno le informazioni a disposizione.



Figura 2.1: Schema del ciclo di vita di un prodotto [3]

Tale metodologia si presenta come uno strumento di supporto per:

- identificare, quantificare, interpretare e valutare gli impatti ambientali di un prodotto, una funzione o un servizio;
- identificare i punti deboli di un prodotto nei diversi stadi del suo ciclo di vita;
- identificare le opportunità di miglioramento degli aspetti ambientali di un prodotto, individuando gli stadi del ciclo di vita che presentano impatto ambientale dominante;
- assistere il processo decisionale delle industrie e della Pubblica Amministrazione (ad esempio: pianificazione strategica, definizione di priorità, ecc...);
- comunicare informazioni ambientali;
- paragonare tra loro prodotti con la medesima funzione;
- aiutare a progettare nuovi prodotti.

L'analisi LCA negli ultimi anni ha trovato spazio in altre numerose applicazioni, infatti essa è alla base della progettazione eco-sostenibile (eco-design), per la progettazione di prodotti eco-compatibili, e può anche essere impiegata efficacemente nella gestione e smaltimento dei rifiuti.

2.2 Origine e sviluppo della metodologia LCA

La valutazione del ciclo vita si è sviluppata molto rapidamente negli ultimi quarant'anni. L'innovazione di tale procedura risiede nella modalità con la quale vengono analizzati e valutati i vari processi industriali. L'analisi è stata eseguita, nel corso del tempo, utilizzando differenti denominazioni, oltre che procedure e metodi, fino al 1990, anno in cui è stata coniata la sua espressione: *Life Cycle Assessment* (LCA).

Dei primi studi parziali sulla LCA risalgono alla fine degli anni '60 e primi anni '70. Si tratta di applicazioni realizzate principalmente per fornire supporto decisionale sul prodotto e sulla strategia di fine vita. Queste operazioni vennero eseguite, oltre che da agenzie governative (*Environmental Protection Agency*, EPA), anche da grandi aziende americane: tra queste si possono annoverare la Coca Cola Company e la Mobil chemical Company Midwet Research Institute. La procedura che era stata impiegata per quelle analisi veniva definita come "from cradle to grave" (dalla culla alla tomba) (Jeren B. Guinée et al., 2010) [4].

Il periodo compreso tra gli anni '70 e '90 è caratterizzato da una certa divergenza negli approcci, metodologie e metodi e risultati. C'era una chiara mancanza di discussioni scientifiche internazionali senza un quadro teorico comune (nessuna piattaforma di scambio di dati per la LCA). La conseguenza di tutto ciò portò a risultati fortemente differenti anche se gli oggetti dello studio erano i medesimi. Tali problematiche di comunicazione hanno dunque impedito all'LCA di diventare lo strumento analitico più comunemente accettato e applicato. È della SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*) il merito di aver avviato un processo di standardizzazione che è culminato, nel 1993, nelle LCA-guidelines ("A code of practice"). (Walter Klopffer, 2006) [5]. In seguito nel 1994, l'Organizzazione internazionale per la standardizzazione (ISO) è stata coinvolta nell'LCA. Mentre i gruppi di lavoro SETAC si sono concentrati sullo sviluppo e l'armonizzazione dei metodi, l'ISO ha adottato il compito formale di standardizzazione di metodi e procedure che hanno condotto alle attuali norme ISO 14040 e ISO 14044. Il 1990 e il 2000 è stato dunque un periodo di convergenza tra questi due enti. Da quel momento in poi la metodologia LCA ha ricevuto un notevole slancio per il suo sviluppo e utilizzo. Nel 2002, il Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente (*United Nations Environmental Programme*, UNEP) e la SETAC hanno avviato una di partnership internazionale, nota come *Life Cycle Initiative*. L'obiettivo principale dell'iniziativa del ciclo di vita è quello di disporre di migliori dati e indicatori.

In seguito a tutti questi sviluppi la LCA è entrata via via a far parte di documenti politici e legislativi su temi di natura ambientale. Tali temi, oggi più che negli anni precedenti, sono divenuti di fondamentale importanza. Attualmente sono quindi impiegati, nelle esecuzioni delle varie analisi, metodi standardizzati a livello internazionale per la quantificazione degli impatti potenziali sull'ambiente e sulla salute umana per un certo bene o servizio.

2.3 Fasi della valutazione del ciclo di vita

Come definito nelle Norme ISO 14040:2006 e 14044:2018 un'analisi LCA si svolge in quattro fasi distinte tra loro concatenate (*Figura 2.2*):

- 1- Obiettivo e campo di applicazione (*Goal and Scope*)
- 2- Analisi d'inventario (*Life Cycle Inventory, LCI*)
- 3- Valutazione dell'impatto del ciclo di vita (*Life Cycle Impact Assessment, LCIA*)
- 4- Interpretazione dei risultati (*Life Cycle Interpretation*)

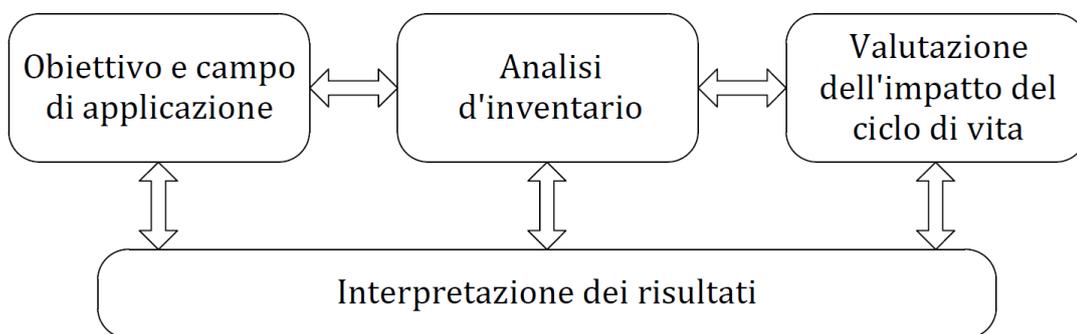


Figura 2.2: Fasi dello studio del ciclo di vita

Si dimostra quindi come tutte le fasi di un processo produttivo siano tra loro correlate e dipendenti. Il processo è iterativo infatti, durante lo svolgimento dell'analisi, quando si rendono via via disponibili informazioni e dati risulta possibile affinare il processo e, se necessario, revisionare ciascuna delle fasi che la caratterizzano. La rilevanza di tale tecnica risiede proprio in questo suo approccio innovativo.

2.3.1 Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione

La fase di definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione di una valutazione del ciclo di vita (LCA), definita dalla norma UNI EN ISO 14040, costituisce la fase preliminare e fondamentale di una LCA, poiché tramite essa si spiega il motivo per il quale si svolge tale studio LCA, si descrive il sistema oggetto preso in considerazione nella analisi e si elencano le categorie di dati da prendere in considerazione nello studio. La norma afferma infatti che: *“L'obiettivo e il campo di applicazione devono essere definiti chiaramente e devono essere coerenti con l'applicazione prevista. A causa della natura iterativa dell'LCA, è possibile che il campo di applicazione debba essere corretto nel corso dello studio.”* Tale definizione deve essere esplicitata nella misura tale da garantire l'ampiezza, la profondità e il dettaglio dello studio che si vuole effettuare; da questa si andrà a strutturare tutta l'analisi.

Gli obiettivi, in particolare, devono specificare:

- l'applicazione prevista;
- le motivazioni per cui lo studio viene intrapreso;
- il tipo di pubblico a cui lo studio è rivolto;
- se i risultati verranno utilizzati in una analisi comparativa e se saranno resi pubblici.

La definizione del campo di applicazione comporta l'approfondimento di differenti tematiche:

- funzioni e sistema prodotto;
- unità funzionale;
- confini del sistema prodotto;
- requisiti di qualità dei dati;
- riesame critico.

Funzioni e sistema prodotto

La norma UNI EN ISO 14040 definisce il sistema prodotto come: *“Insieme elementare di unità di processo, connesse tra loro per quanto riguarda materia ed energia, che perseguono una o più funzioni definite”*.

Il sistema di prodotto è quindi suddiviso in unità di processo, ciascuna delle quali include tutte le possibili attività relative ad un'operazione o ad un gruppo di operazioni. Queste sono connesse tra loro da *flussi intermedi* e con l'ambiente da *flussi elementari*. Si definisce flusso elementare un flusso di materia o energia entrante nel sistema che è stato prelevato dall'ambiente senza alcuna trasformazione da parte dell'uomo o un flusso di materia o energia uscente dal sistema che non subisce alcun'altra trasformazione da parte dell'uomo. Un flusso intermedio (o flusso non elementare) è invece un flusso di materia o energia entrante nel sistema prodotto dall'uomo (Figura 2.3). Le proprietà fondamentali che caratterizzano un sistema di prodotto sono le sue funzioni (ovvero le caratteristiche di prestazione).

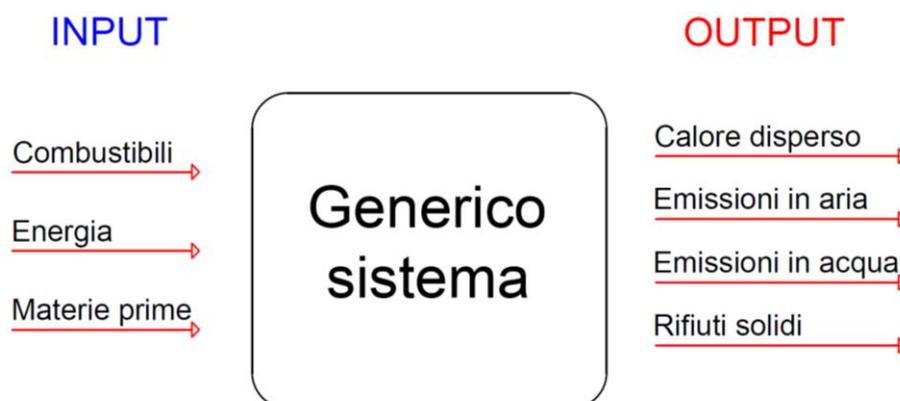


Figura 2.3: Definizione del sistema prodotto

Unità funzionale

Viene così definita nella ISO 14040: *“Misura della prestazione del flusso in uscita funzionale del sistema prodotto. Lo scopo principale dell’unità funzionale è di fornire un riferimento a cui legare i flussi in uscita ed in entrata. Questo riferimento è necessario per consentire la comparabilità dei risultati della LCA, che risulta essere critica quando si valutano sistemi differenti, perché ci si deve assicurare che il confronto venga fatto su base comune”*.

L’unità funzionale indica il prodotto, il servizio o la funzione su cui impostare l’analisi. La scelta di tale unità è arbitraria e rappresenta l’unità di misura di riferimento del nostro studio a cui tutti i dati in ingresso ed in uscita saranno normalizzati (in senso matematico) in maniera tale da permettere la comparabilità dei risultati. La comparabilità può risultare critica quando si valutano i risultati di sistemi diversi poiché la base di comparazione deve essere la medesima. Tale unità oltre che essere chiaramente definita deve essere anche chiaramente misurabile.

Confini del sistema prodotto

I confini del sistema prodotto rappresentano le unità di processo che bisogna includere nella LCA. Questi devono essere naturalmente coerenti con l’obiettivo dello studio. Per descrivere il sistema prodotto si fa uso di diagrammi di flusso che indicano le unità di processo e le loro interrelazioni. Per stabilire i confini del sistema, normalmente si prendono in considerazione le seguenti fasi (*Figura 2.4*):

- flussi in ingresso ed in uscita;
- acquisizione materie prime;
- distribuzione e trasporto;
- processo di fabbricazione;
- produzione ed utilizzazione di combustibili, elettricità, e di calore;
- uso e manutenzione del prodotto;
- riciclo e gestione dei rifiuti.

Particolarmente importanti inoltre risultano essere i seguenti i seguenti criteri per l’inclusione degli input e output:

- flusso di massa: comprende l’inclusione di tutti gli input che contribuiscono per una determinata percentuale alla massa del sistema prodotto;
- flusso di energia: include nello studio gli input che contribuiscono, come per la massa, ad una certa percentuale degli input energetici del sistema prodotto;
- rilevanza ambientale: medesime considerazioni come per la massa e l’energia.



Figura 2.4: Schema diagramma di flusso

A questo segue la possibile successiva esclusione delle componenti che risultano essere irrilevanti nella ricerca di informazioni che le caratterizzano. Si applicano quindi le regole di cut-off, le quali consistono nella esclusione dall'analisi di inventario di alcuni flussi di materia o di energia. Qualsiasi decisione di omettere fasi, processi, input o output del ciclo di vita deve essere chiaramente dichiarata e devono essere spiegati i motivi e le implicazioni per i quali sono stati omessi. In egual misura potrebbero essere incluse nella analisi altre componenti alle quali inizialmente non si era attribuita un'adeguata importanza.

Requisiti di qualità dei dati

Le richieste relative alla qualità dei dati in generale descrivono le caratteristiche che devono avere i dati utilizzati per lo studio. La descrizione della qualità dei dati è rilevante per capire l'affidabilità dei risultati dello studio e di conseguenza interpretarlo correttamente. Si tratta di un aspetto fondamentale da dover tener in considerazione. Affinché si possa fornire credibilità allo studio occorre garantire, oltre a indicazioni geografiche temporali e tecnologiche, informazioni sulla precisione (variabilità dei valori per ogni categoria), rappresentatività, coerenza e riproducibilità del risultato. Occorre inoltre fare particolare attenzione alla fonte dalla quale si ottengono i dati e sull'incertezza che risulta essere associata a quell'informazione (ipotesi impiegate nei modelli).

Riesame critico

La revisione critica, di uno studio LCA, costituisce una fase obbligatoria solo nel caso di comparazione tra vari sistemi. L'obiettivo è quello di valutare se l'analisi è stata eseguita rispettando gli standard e se i risultati sono attendibili. Qual ora dovesse essere eseguita risulta necessario definire, nell'ambito dello studio, il tipo di revisione che occorre effettuare e chi effettuerebbe tale revisione (con relativo livello di competenza).

2.3.2 Analisi d'inventario

L'analisi d'inventario costituisce la base dell'analisi LCA. Tale analisi comprende la raccolta dei dati e i procedimenti di calcolo, che consentono di quantificare i flussi in entrata e in uscita di un sistema prodotto. Si tratta di un processo iterativo: man mano che si raccolgono dati e informazioni può emergere la necessità di ottenere informazioni su altri aspetti. In tale fase viene quindi prodotta una lista contenente le quantità di sostanze consumate e rilasciate in aggiunta alle, materie prime ed energia impiegate. L'inventario costituisce il cuore della LCA ed è diviso in tre moduli:

- raccolta dati: prevede la realizzazione di un diagramma di flusso dei vari processi. Lo scopo è quello di rappresentare dettagliatamente tutte le unità processo. Fanno parte della raccolta dati tutti gli input di energia, materie prime, materiali ausiliari, prodotti, coprodotti, rifiuti, emissioni in aria, scarichi al suolo e in acqua;
- elaborazione dei dati: validazione dati raccolti e loro relativizzazione rispetto all'unità funzionale. Ogni dato deve essere esplicitamente documentato;
- allocazione: attribuzione dei flussi in entrata ed in uscita in base ai prodotti e coprodotti.

Nell'analisi d'inventario è quindi importante costruire un diagramma di flusso dettagliato delle operazioni che contribuiscono a formare il sistema considerato. Per la raccolta dati è necessario conoscere in maniera completa e dettagliata tutte le unità di processo del sistema. I dati impiegati nella analisi possono avere origini differenti e si possono distinguersi in:

- dati primari: raccolti direttamente sul campo o dal sito di produzione;
- dati secondari: provenienti da database, alcuni dei quali possono essere contenuti in software specifici;
- dati terziari: estratti da manuali tecnici, enciclopedie e letteratura scientifica oppure ricavati da stime o coefficienti tecnici (in tal caso specificare il metodo di calcolo).

Naturalmente i dati che devono essere prediletti per uno studio LCA sono quelli primari, i quali però sono anche i più difficili da ottenere.

Da non sottovalutare è l'allocazione, ovvero la ripartizione nel sistema prodotto dei flussi in entrata e in uscita dalle unità di processo. Il problema dell'allocazione si ha nel momento in cui un processo industriale ha più di un prodotto e ricicla i prodotti intermedi o di scarto come fossero materie prime.

Occorre precisare che l'obiettivo dell'analisi d'inventario è quello di fornire dei dati oggettivi che verranno poi elaborati nella fase successiva. Nella seguente fase non verrà dunque fatta nessuna valutazione degli impatti di un prodotto o processo.

2.3.3 Valutazione dell'impatto del ciclo di vita

La valutazione di impatto del ciclo di vita (*Life Cycle Impact Assessment, LCIA*) è la terza fase della LCA e ha come scopo quello di identificare e quantificare i temi ambientali rilevanti (risorse, impatti globali, impatti regionali e locali) e di trasformare ciascun flusso di sostanze della tabella di inventario in un contributo ai temi ambientali.

In questa fase si vogliono quindi evidenziare le entità delle modifiche ambientali che si verranno a verificare in seguito alle emissioni nell'ambiente e al consumo di risorse provocate dall'attività produttiva.

La procedura della Valutazione di impatto fa riferimento alla UNI EN ISO 14044 che la suddivide in cinque fasi:

- scelta e definizione delle categorie d'impatto;
- classificazione;
- caratterizzazione;
- normalizzazione;
- valutazione.

Ai sensi della norma solo le fasi di classificazione e caratterizzazione sono obbligatorie. Prima di poter svolgere l'analisi occorre quindi **individuare le categorie di impatto**, gli indicatori di categoria (*Category Indicator*) e i modelli i quali dovranno essere espressi in accordo con gli obiettivi e il campo di applicazione dello studio (fase preliminare). Ogni modello impiegato dovrà essere naturalmente scientificamente e tecnologicamente valido.

La prima vera fase della LCIA è dunque quella della **classificazione** in cui vengono identificate le categorie d'impatto su cui agisce il sistema in esame. Una categoria d'impatto è una classe che rappresenta il tipo di problematica ambientale a cui l'impatto può essere assegnato. Tali categorie possono essere differenti e dipendono dal metodo impiegato per effettuare l'analisi. Generalmente sono impiegate categorie ambientali già esistenti, ma in taluni casi potrebbe essere necessario introdurre nuove categorie di impatto il tutto nel rispetto dello scopo, dei confini dell'analisi e delle problematiche ambientali connesse al prodotto studiato.

Per la loro definizione occorre tenere conto dei seguenti tre criteri:

- completezza: considerare tutte le categorie a breve e a lungo termine su cui il sistema potrebbe agire;
- indipendenza: evitare intersezioni tra le categorie, conteggi multipli;
- praticità: la lista formulata non dovrà comunque contenere un numero eccessivo di categorie.

Quelle impiegate nella seguente analisi, appartenenti al metodo ILCD 2011 Midpoint, possono essere raggruppate nella tabella seguente (*Tabella 2.1*):

Tabella 2.1: Categorie d'impatto

CATEGORIE D'IMPATTO	
Potenziali impatti ambientali	Cambiamenti climatici
	Assottigliamento della fascia di ozono
	Radiazioni ionizzate: ecosistema
	Smog fotochimico
	Acidificazione
	Eutrofizzazione terrestre
	Eutrofizzazione acquatica
	Eutrofizzazione marina
	Ecotossicità
	Uso del terreno
Salute umana	Tossicità umana: cancro
	Tossicità umana: non cancro
	Materia particolare
	Radiazioni ionizzate: salute umana
Consumo di risorse	Consumo di acqua
	Consumo di risorse naturali ed energia

Selezionate le categorie d'impatto è necessario individuare i bersagli (Endpoints), in relazione agli effetti che hanno sulla salute umana, sull'ecosistema e sull'esaurimento di risorse che identifica un tipo di problematica ambientale. Si potrebbero generare delle complicanze poiché ad una stessa sostanza possono contribuire diversi fenomeni d'impatto.

La **caratterizzazione** è la terza fase della LCIA in cui si quantifica l'impatto attraverso dei fattori di caratterizzazione e si aggregano gli effetti ambientali all'interno delle categorie prescelte aventi la medesima unità di misura. Questi sono rappresentativi degli impatti agenti sull'ambiente e sulla salute umana, e permettono di esprimere quantitativamente il contributo fornito ad ogni categoria.

Per ciascuna categoria d'impatto è stato elaborato un modello di quantificazione comprovato. Ad esempio, per la quantificazione dell'effetto serra, l'IPCC (*International Panel on Climate Change*) ha realizzato un modello per valutare il potenziale di riscaldamento globale (*Global Warming Potential, GWP*) dei gas serra e risulta espresso in chilogrammi di CO₂ equivalenti (IPCC, 2007) [6].

La fase finale della caratterizzazione è il "Profilo Ambientale" che è costituito da una serie di punteggi d'impatto per ogni categoria, generalmente rappresentato con un istogramma a barre.

La quarta fase della LCIA è la **normalizzazione** che elabora i risultati ottenuti dalla caratterizzazione in modo tale da ottenere degli indici con cui valutare il sistema oggetto dello studio. Risulta dunque possibile effettuare il confronto. Tale operazione risulta però opzionale poiché i parametri di normalizzazione si basano su valutazioni soggettive. D'altro canto, la normalizzazione permette di individuare errori o incongruenze fornendo un supporto per la fase successiva di interpretazione.

L'ultima fase della LCIA è la **valutazione** che consiste nell'assegnazione di un peso relativo alle varie categorie d'impatto e nella stima finale dei risultati. Questi fattori di peso infine, vanno moltiplicati per i punteggi ottenuti e sommati per avere un indice ambientale finale. Queste ultime due fasi però, secondo la norma ISO 14044, non sono fasi obbligatorie.

Analisi aggiuntive sulla qualità dei dati della LCIA possono essere:

- analisi di gravità: procedura statistica per l'individuazione del risultato che ha il maggior contributo sul risultato dell'indicatore;
- analisi di incertezza: individuazione dell'incertezza dei dati e delle ipotesi;
- analisi di sensibilità: procedura per determinare in che modo le scelte metodologiche incidono sui risultati della LCIA.

2.3.4 Interpretazione dei risultati del ciclo di vita

L'ultima fase dell'analisi del ciclo di vita (*Life Cycle Interpretation*) è l'interpretazione. Questa fase consiste in una tecnica sistematica (iterativa) che prevede di identificare, controllare e valutare tutte le informazioni relative all'analisi di inventario e agli impatti. La fase di interpretazione può comportare inoltre un processo di revisione del campo di applicazione dell'LCA, nonché della natura e della qualità dei dati raccolti in modo da essere coerente con l'obiettivo definito.

Come stabilito dalla norma ISO 14044 tale fase risulta suddivisa principalmente in tre differenti tipologie di controlli:

- controllo di completezza;
- controllo di sensibilità;
- controllo di coerenza.

L'*analisi di completezza* controlla che le informazioni fornite nel corso dell'analisi necessarie per l'interpretazione siano disponibili e complete. L'*analisi di sensibilità* permette di verificare la validità dei dati e quanto questi influiscano sul risultato finale. L'*analisi di coerenza* verifica le assunzioni fatte e i metodi impiegati per l'analisi, sempre nel rispetto dell'obiettivo e del campo di applicazione.

Infine, come ultima procedura di questa parte occorre definire le conclusioni, identificare le limitazioni e fare le raccomandazioni. Le *conclusioni* sono definite a partire dai risultati ottenuti, coerenti con lo studio. A partire dalle conclusioni si fanno poi le *raccomandazioni* le quali altro non sono che una logica conseguenza. Lo scopo finale è quello di raggiungere la massima eco-efficienza.

L'esito di un'analisi LCA rappresenta il punto di partenza di tutta una serie di processi decisionale che andranno a coinvolgere tematiche economiche e sociali.

2.4 Presentazione dei risultati

La divulgazione dei risultati è una parte integrante di un'analisi LCA. Un rapporto efficace dovrebbe essere strutturato in maniera tale da affrontare le diverse fasi dello studio in esame e fornire al pubblico i risultati e le conclusioni dell'LCA. Una presentazione adeguata deve fornire informazioni sui dati, metodi e ipotesi applicati nello studio oltre alle relative limitazioni.

In particolare, se lo studio deve essere divulgato a terzi, devono essere segnalati i seguenti problemi:

- la relazione dettagliata con i risultati di LCI;
- una descrizione della qualità dei dati;
- le finalità di categoria da proteggere;
- l'identificazione delle categorie di impatto;
- i modelli di caratterizzazione utilizzati;
- i fattori e meccanismi ambientali;
- il profilo dei risultati dell'indicatore.

È di supporto inoltre includere riferimenti e descrizione delle scelte dei valori utilizzati nella fase di studio in relazione ai modelli di caratterizzazione, normalizzazione, ponderazione, ecc.

2.5 Riesame critico

La revisione critica è un processo dell'analisi per verificare se la LCA ha soddisfatto i requisiti di metodologia, dati, interpretazione e se è coerente con i principi delle norme. Un riesame critico può fornire ulteriore validità e credibilità agli studi LCA, coinvolgendo ad esempio le parti interessate. Un riesame critico può essere eseguito in due diverse modalità:

- riesame critico tramite esperto interno o esterno. Tale esperto deve avere dimestichezza con i requisiti della LCA oltre a possedere adeguate competenze scientifiche e tecniche;
- riesame critico tramite un comitato delle parti interessate. Un esperto esterno ed indipendente è nominato a capo di questo comitato di un gruppo di revisione di almeno tre membri. Sulla base dell'obiettivo, dell'ambito e del budget disponibili per la revisione, il presidente deve selezionare altri revisori qualificati indipendenti. Questo comitato può anche includere altre parti interessate dalle conclusioni tratte dalla LCA, ad esempio agenzie governative e non, concorrenti e industrie interessate.

2.6 Vantaggi e limiti della LCA

Lo studio di LCA rappresenta un supporto per politiche ambientali di prodotti o processi produttivi fornendo informazioni sugli effetti ed impatti. Risulta infatti possibile quantificare i rilasci in aria, acqua e suolo per ognuna delle fasi del ciclo vita. A partire dai rilasci si possono identificare gli sviluppi sui cambiamenti delle principali problematiche ambientali.

L'analisi permette di valutare non solo gli effetti sull'ambiente, ma anche sulla salute umana. Ognuno dei vari impatti sarà infatti raggruppato in una propria categoria e per ognuna di esse sarà possibile valutare quanto una particolare fase o processo incida sulla categoria stessa.

La possibilità del confronto tra due o più prodotti permette di valutare ed individuare quale di questi sia quello meno impattante oppure come migliorare le prestazioni delle fasi del ciclo vita per renderli più sostenibili.

I motivi che spingono ad intraprendere uno studio LCA sono profondamente diversi a seconda del contesto in cui tale studio si colloca e a chi saranno poi rivolti i risultati. Generalmente l'analisi, e l'informazione ad essa associata, viene fornita per le singole imprese (imprenditore privato/industria) oppure per le organizzazioni pubbliche (autorità di governo).

Nonostante i vari vantaggi, la metodologia LCA presenta diversi limiti; questi riguardano soprattutto la disponibilità e reperibilità di dati completi e precisi, la complessità dello studio e le considerevoli risorse richieste in termini di costo e tempo.

Si incontrano, difficoltà soprattutto quando si analizzano prodotti nuovi, poiché i dati necessari devono essere ipotizzati ma la maggior parte di questi ostacoli può essere superata, ad esempio effettuando ipotesi semplificative coerenti ed utilizzando dati provenienti da database ritenuti affidabili. Importante in uno studio di LCA è la natura delle scelte e delle assunzioni che nella maggior parte dei casi può essere soggettiva.

I modelli utilizzati per l'analisi d'inventario o per la valutazione degli impatti non sono adatti a qualunque applicazione e non sono in grado di descrivere in modo completo qualsiasi impatto ambientale.

La LCA è inoltre maggiormente applicabile ad indicatori d'impatto su scala globale (ad esempio, cambiamenti climatici) e meno agli impatti locali come lo smog, dove i fattori temporali e spaziali delle emissioni hanno più rilevanza.

Occorre precisare che uno studio LCA non identifica in assoluto quale sia il prodotto migliore, ma fornisce solamente informazioni tali da permettere una valutazione e una presa di posizione con maggior consapevolezza.

Infine, differentemente da altre procedure di valutazione, la LCA non comprende gli impatti economici e sociali di un sistema di prodotti. Questi, ad esempio, sono oggetto di studio delle valutazioni d'impatto ambientale.

2.7 Applicazione della LCA nell'edilizia

L'innovazione della procedura LCA risiede nella possibilità di studiare, in un contesto ambientale, l'intero ciclo di vita di un prodotto o un servizio, valutandone energia e materia prima necessari, secondo un approccio che viene definito "dalla culla alla tomba"

Tale procedura, impiegata ampiamente negli ultimi anni in ambito industriale, trova oggi applicazione anche in ambito edilizio: tramite tale analisi risulta infatti possibile stimare gli impatti nell'ambiente sia alla scala di prodotto che a quella di edificio. Il fondamento di tale metodologia è quello di comprendere come ogni scelta effettuata in fase di progettazione abbia poi delle ricadute nella fase di costruzione, uso e dismissione. Occorre disporre di una conoscenza approfondita dell'oggetto in esame al fine di fare scelte consapevoli sulle varie procedure. La LCA costituisce un metodo scientificamente riconosciuto per una valutazione quantitativa dei danni ambientali dovuti ad un particolare prodotto, edificio o servizio.

Le normative a cui far riferimento per le analisi sono le medesime per tutti gli studi LCA: la ISO 14040 e la ISO 14044, che definiscono il quadro normativo ed i principi chiave su cui si basa la procedura. Nell'ambito edilizio, nello specifico alla scala dell'edificio, le norme a cui occorre far riferimento sono le ISO/CD 21930, ISO/CD 21931 e ISO/CD 21932.

Per la valutazione LCA di un edificio di nuova costruzione bisogna prima di tutto definire la vita nominale dell'opera stessa (in relazione alla funzione che dovrà svolgere). A partire da questa occorrerà andare ad identificare i cicli manutentivi e i consumi energetici complessivi della struttura nella fase di utilizzo. Per ogni fase del ciclo vita dell'edificio devono essere considerati i flussi in entrata ed uscita. Le fasi sono 5 e possono essere così classificate:

- fase di costruzione dell'edificio: vengono indicati all'interno della seguente fase tutti i materiali edili necessari per la costruzione; le quantità sono stimate a partire da un computo metrico della struttura. Si tratta dell'analisi d'inventario da cui partire per valutare gli impatti della costruzione. Ad ogni materiale sarà associato un certo flusso in ingresso e in uscita, al quale si aggiunge anche la valutazione dei consumi dei macchinari impiegati nell'operazione di costruzione (gru, escavatori, camion);
- fase di costruzione del sistema impiantistico: occorre considerare tutti i materiali necessari per le varie componenti dell'impianto elettrico, idrico e termico;
- fase di fine vita dei materiali: per ogni materiale impiegato nell'edificio deve essere stimato l'impatto indotto dalla dismissione del materiale stesso. Lo scenario a fine vita deve essere studiato al fine di avere il minor impatto ambientale possibile;
- fase di gestione: in tale fase occorre stimare i materiali e i componenti che devono essere sostituiti poiché obsoleti. I cicli manutentivi degli impianti consentono di

mantenere nel tempo, come richiesto in fase di progetto, le prestazioni necessarie al corretto funzionamento della struttura;

- fase di utilizzo: rientrano in questa fase tutti i consumi associati all'edificio durante il suo uso. Occorrerà stimare i fabbisogni annui in termini di consumo idrico ed elettrico.

L'obiettivo della valutazione LCA per gli edifici è ottenere un impatto ambientale complessivo dell'intera vita dell'edificio stesso (LCA_{tot}) che, compatibilmente con i carichi statici, dinamici, termici ed acustici, sia il minore possibile ($LCA_{tot,min}$) [7]. L'equazione 1 mostra il calcolo della LCA_{tot} e risulta così definita:

$$LCA_{tot} = LCA_{materiali} + LCA_{impianti} + LCA_{rifiuti} + LCA_{manutenzione} + LCA_{consumi} \quad (1)$$

Con:

$LCA_{materiali}$ = LCA dei materiali e dei vari componenti costruttivi dell'edificio;

$LCA_{impianti}$ = LCA dei materiali che costituiscono il sistema impiantistico;

$LCA_{rifiuti}$ = LCA dei materiali edili ed impiantistici al fine della loro vita;

$LCA_{manutenzione}$ = LCA delle opere di manutenzione;

$LCA_{consumi}$ = LCA dei consumi energetici ed idrici.

Anche se non rientrano nell'analisi LCA effettiva, devono essere stimati anche i costi monetari al fine di cercare la migliore combinazione tra costi ed impatti.

La LCA è uno strumento oggettivo e scientifico che permette al progettista di scegliere, durante la fase di progettazione (sia che si tratti di un nuovo edificio o di una ristrutturazione) la soluzione meno impattante da un punto di vista ambientale per ogni elemento o fattore che interviene nella costruzione. Inoltre, sia i costi esterni (ambientali) che quelli interni (economici) possono costituire un importante parametro decisionale per le politiche costruttive dell'edificio, in accordo con gli attuali standard ambientali.

Come già anticipato nel Capitolo 2.6, la tecnica LCA è caratterizzata da alcuni limiti che possono mettere in dubbio la scientificità del risultato. Il problema consiste principalmente nella disponibilità e accessibilità dei dati iniziali. Nel contesto italiano, dove non esiste una banca dati ufficiale, diventa necessario far riferimento a banche dati straniere con inevitabili approssimazioni. In aggiunta a ciò, si assiste spesso ad una scarsa disponibilità da parte delle aziende a fornire dati sul consumo e sulla produzione di rifiuti, che può rendere molto difficoltosa la fase di inventario.

2.7.1 Il patrimonio edilizio esistente

Le strutture in cemento armato, realizzate nella seconda metà del ventesimo secolo, rappresentano circa il 50 % del patrimonio edilizio italiano (Feroldi et al., 2014) [8]. In molti casi, tali edifici sono prossimi al termine della loro vita nominale di progetto (stimata in 50 anni, secondo le attuali norme vigenti) e sono caratterizzati da una scarsa efficienza energetica, elevata vulnerabilità sismica, disagio abitativo e spesso ridotta qualità architettonica ed urbana. Per quanto riguarda le prestazioni energetiche, queste sono così scarse che gli enormi livelli di energia consumata collocano il settore edile tra le principali fonti di emissioni di CO₂. Esso ha quindi un impatto enorme, non trascurabile, sull'ambiente economico, ecologico e sociale.

Nel II dopoguerra, per far fronte alla notevole domanda immobiliare, sono stati costruiti edifici in cemento armato con caratteristiche strutturali ed architettoniche oggi ritenute scadenti. Tali carenze strutturali si riscontrano oggi come conseguenza al progredire delle conoscenze nel settore edile. Si tratta generalmente di edifici multipiano situati in contesti urbani degradati; spesso non soddisfano i requisiti minimi nei confronti dei carichi verticali o meno ancora nei confronti delle azioni sismiche in accordo alle attuali prescrizioni di norma (NTC 2018).

Le soluzioni possibili che si presentano a tale problema sono due: interventi di demolizione e ricostruzione o riqualificazione. La prima soluzione, benché più semplice, non è percorribile su larga scala per problemi legati alla sostenibilità (consumo di materie prime e smaltimento di rifiuti e macerie). Inoltre, la recente crisi economica ha drasticamente ridotto gli investimenti nel settore edile in tutti i paesi europei e il numero di nuovi edifici, in proporzione agli anni precedenti, è drasticamente diminuito. La seconda soluzione risulta di conseguenza più vantaggiosa da un punto di vista ambientale (minori sprechi ed emissioni). Per mezzo di un esoscheletro, da un punto di vista strutturale, risulta possibile riqualificare e rinforzare l'edificio aumentando al contempo il relativo valore architettonico nel contesto urbano in cui è inserito.

La soluzione di recupero e miglioramento si dimostra essere dunque la più efficiente, in quanto all'operazione di riqualificazione sostenibile si associa una strategia di riabilitazione strutturale e di riduzione del consumo energetico.

Oggigiorno, nonostante alcune strutture non siano resistenti nei confronti di un sisma, il rinforzo strutturale viene spesso messo in secondo piano optando per un restauro energetico ed architettonico dell'edificio. Se si trascura l'importanza del rafforzamento le conseguenze possono essere gravi. Si stima infatti, secondo un rapporto sul rischio sismico redatto dal Dipartimento della Protezione Civile nel settembre 2010 [10], che dal terremoto del Belice del 1968 al 2010 lo Stato abbia speso circa 147 miliardi di euro (per un valore medio annuo pari a 3.6 miliardi di euro) per la gestione delle emergenze post-sisma. Degli investimenti

tanto ingenti nella messa in sicurezza degli edifici vulnerabili, anziché nelle fasi di riparazione e ricostruzione in seguito all'evento, porterebbero a risultati molto diversi in caso di futuri terremoti. A ciò si devono aggiungere le conseguenze non traducibili in valore economico sulla perdita in termini di vite umane, la quale rappresenta l'aspetto più dolente delle valutazioni a valle di un sisma e denuncia una vulnerabilità inaccettabile del patrimonio edilizio. L'intervento di riqualificazione strutturale dovrà dunque avvenire contemporaneamente a quello di restyling della struttura (da un punto di vista economico, evitando operazioni isolate, si ottiene una soluzione a minor costo).

Per poter effettuare l'analisi occorre prima di tutto identificare e classificare il patrimonio edilizio italiano:

- numero di edifici;
- posizione;
- tipologia
- dimensioni;
- tecnologia costruttiva e materiali impiegati

Gli edifici devono essere studiati per identificarne le principali carenze prestazionali. È emerso che il 61,5% (6.903.982) degli edifici residenziali è costituito da strutture portanti in muratura, il 24,7% (2.768.205) è costituito da strutture in cemento armato (*Reinforced Concrete*, RC) e il 13,8% (1.554.408) sono altre tipologie di strutture (in legno, acciaio o altre) (Marini et al., 2014) [9]. Nel caso di edifici o opere storiche la demolizione non viene mai presa in considerazione; per preservarne la cultura si effettuano operazioni di restauro, conservazione e manutenzione. La demolizione può essere però necessaria nel caso di strutture fortemente danneggiate (instabili e a rischio di collasso).

2.7.2 Edilizia e ambiente

L'edilizia è uno dei principali settori che consumano più energia, in maniera diretta (costruzione, esercizio, demolizione e dismissione) o indiretta (estrazione, lavorazione e produzione dei materiali edili). Tra le varie fasi quella più lunga del ciclo vita è l'utilizzo; dura diversi decenni e produce degli impatti ambientali notevoli. I principali consumi richiedono energia per il riscaldamento dell'acqua potabile, l'elettricità per l'illuminazione, il raffreddamento per la ventilazione, nonché i sistemi di condizionamento dell'aria. Il principale impatto è legato alla produzione di elettricità con conseguente formazione di un notevole quantitativo di inquinanti (emissione di un grande volume di gas serra, anidride solforosa e gas di azoto, oltre al consumo di risorse fossili). Dal punto di vista del consumo gli edifici del II dopoguerra sono poco efficienti con un notevole spreco di energia rispetto a strutture più moderne (molto più efficienti). Tramite la riqualificazione, il potenziale

risparmio di energia associato a questi vecchi edifici sarebbe notevole con un vantaggio non solo economico ma anche sociale e soprattutto ecologico.

Tra le opportunità per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici si può considerare (JRC, 2012) [11]:

- un miglioramento delle prestazioni termiche del tessuto edilizio mediante isolamento di pareti, pavimenti e coperture e sostituzione dei serramenti (finestre e porte);
- un miglioramento delle prestazioni energetiche di riscaldamento, ventilazione, aria condizionata e sistemi di illuminazione;
- un'installazione di tecnologie rinnovabili come pannelli fotovoltaici, collettori solari termici, caldaie a biomassa o pompe di calore;
- un'installazione di elementi costruttivi per la gestione dei guadagni di calore solare.

Il concetto di *Life Cycle Thinking* (LCT) fornisce, con gli approcci di valutazione del ciclo di vita (LCA) e dei costi del ciclo di vita (LCC), una serie di strumenti e metodologie per valutare i potenziali impatti ambientali ed economici per raggiungere la condizione di sostenibilità. L'Europa riconosce infatti l'importanza di queste metodologie per valutare le varie prestazioni degli edifici, in modo da identificare la soluzione migliore tra varie alternative. Per un progetto di ristrutturazione, ad esempio, ogni operazione decisionale ha un certo costo e un certo impatto; la soluzione più ottimale sta nell'identificare la condizione a maggior risparmio e beneficio per l'ambiente.

2.7.3 Direttiva europea 2008/98/CE

La *European Construction Technology Platform*, e la sua visione strategica sui materiali da costruzione (ECTP, 2005) [12], ha come obiettivo la riduzione dell'impatto ambientale nella produzione e demolizione dei materiali edili entro il 2030 e, in particolare, che si abbia la:

- riduzione del 50% del consumo di energia e delle emissioni di CO₂ di nuovi edifici;
- riduzione del 30% del consumo di energia e delle emissioni di CO₂ di edifici esistenti;
- riduzione del 30% delle materie prime necessarie per la produzione di nuovi materiali da costruzione oltre che delle emissioni di CO₂ e dell'energia consumata;
- riutilizzo al 100% dei rifiuti di costruzione e demolizione;
- riduzione specifica del 30% delle emissioni di CO₂ della produzione di materiali da costruzione.

Si tratta di una proposta importante che garantirebbe un enorme vantaggio da un punto di vista ambientale.

In questo contesto di riduzione degli impatti ambientali si inserisce la direttiva europea 2008/98/CE [13]. Tale direttiva afferma che: *“Entro il 2020 la preparazione per il riutilizzo, il riciclaggio e altri tipi di recupero di materiale, incluse operazioni di colmatazione che utilizzano i rifiuti in sostituzione di altri materiali, di rifiuti da costruzione e demolizione non pericolosi, escluso il materiale allo stato naturale definito alla voce 17 05 04 dell’elenco dei rifiuti, sarà aumentata almeno al 70 % in termini di peso”*; prevede cioè che entro il 2020 si raggiunga un livello pari al 70% di riciclo dei rifiuti derivati dalle fasi di demolizione e costruzione. Legambiente denuncia però l'inerzia del governo nello stimolare l'attuazione di tale direttiva, la quale, pur recepita dal Dlgs 205/2010 [14], non è seguita da decreti attuativi o da azioni che ne stimolino l'applicazione. Già il DM 203/2003 [15] prevedeva di coprire il 30% del fabbisogno di manufatti e beni attraverso materiali riciclati, ma Legambiente sottolinea nuovamente come questo non avvenga quasi mai. In teoria in Italia non esistono impedimenti tecnici che ne ostacolerebbero l'utilizzo; nella realtà effettiva, si ha tuttavia una certa difficoltà nell'utilizzare materiali provenienti dal recupero. Un primo problema è rappresentato dai capitolati per lavori pubblici o privati, i quali impongono limiti all'utilizzo di aggregati riciclati (ad esempio nel calcestruzzo, in cui percentuale di aggregati derivanti dalla demolizione che può essere impiegata è molto limitata).

Questo problema limita l'applicazione della direttiva per il raggiungimento del target del 70%. Se si raggiungesse questo obiettivo si potrebbero generare oltre 23 milioni di tonnellate di materiali permettendo la chiusura di almeno 100 cave di ghiaia e sabbia per un anno [16].

A partire da Anas alle concessionarie autostradali, da RFI alle stazioni appaltanti comunali, occorrerebbe che venissero rivisti i capitolati che ancora fissano delle barriere per l'utilizzo dei materiali riciclati. La diffidenza generale dovrebbe essere colmata dal Ministero delle Infrastrutture e dell'Ambiente al fine di costituire le condizioni base per il raggiungimento degli obiettivi europei prefissati.

La possibilità che si può delineare è formare un nuovo *modus constructivus* in cui siano le imprese stesse a gestire il processo di demolizione selettiva degli inerti provenienti dalle costruzioni e al tempo stesso riciclarli invece di portarli in discarica.

L'Italia deve recuperare il ritardo rispetto agli altri Stati europei che hanno già da tempo introdotto delle politiche per il riutilizzo di questa particolare categoria di rifiuti con percentuali incoraggianti: Olanda 90%, Belgio 87%, Germania (86.3%) [17].

2.8 Obiettivo e campo di applicazione

Per il lavoro di tesi oggetto di studio si è analizzato il ciclo vita di un edificio residenziale situato nella periferia sud di Torino (Mirafiori). Si tratta di un palazzo di 9 piani fuori terra per il quale si è raggiunto e superato il limite di vita nominale (50 anni). La porzione del ciclo vita che è stata analizzata è quella relativa alla demolizione (parziale e totale) della struttura preesistente e alla realizzazione di una nuova opera. Lo studio in esame è strutturato su due differenti scenari:

- Scenario I: demolizione completa della struttura (demolizione selettiva) e realizzazione di una nuova struttura più efficiente da un punto di vista energetico e strutturale con rispetto delle attuali norme;
- Scenario II: demolizione soltanto di alcuni elementi della struttura e riqualificazione dell'edificio esistente tramite la realizzazione di un esoscheletro esterno (involucro) che permetta, oltre a stabilizzarla sismicamente, anche di migliorarne l'efficienza termica ed energetica. Un ulteriore valore aggiunto è il miglioramento estetico della struttura esistente ormai datata.

Per entrambi gli scenari si valuta poi il comportamento del sistema nel caso in cui si abbia il riciclo del materiale demolito (ulteriore riduzione degli impatti) con conseguente produzione di ulteriore materiale per la nuova struttura o per altre opere. Si è effettuata la scelta di studiare queste due differenti configurazioni per evidenziare il notevole vantaggio, in termini di impatto sull'ambiente, che si ricaverebbe evitando la realizzazione di un nuovo edificio. L'obiettivo è quindi quello di rendere le operazioni di riqualificazione più sostenibili da un punto di vista ambientale. Per entrambi gli scenari, l'unità funzionale (l'unità di misura di riferimento) oggetto del seguente studio è la superficie d'impronta al piano campagna dell'edificio originario, la quale dovrà rimanere la medesima nei due scenari: 382.8 m².

I confini del sistema studiato vanno dall'allestimento dell'area di cantiere fino allo smantellamento e trattamento dei materiali da demolizione. Sono racchiusi all'interno dei confini del sistema tutti i processi relativi al trasporto delle macerie e dei nuovi materiali.

Capitolo 3

Life Cycle Inventory Analysis (LCI)

Come anticipato nel Capitolo 2.8 l'analisi si basa sullo studio di due differenti scenari:

- Scenario I: demolizione selettiva e ricostruzione ex novo della struttura nel rispetto delle attuali norme vigenti;
- Scenario II: demolizione parziale di alcuni elementi della struttura (tetto, balconi, alcuni elementi di muratura) e realizzazione di un esoscheletro esterno per stabilizzare la struttura stessa e renderla esteticamente migliore.

Tali scenari si suddividono poi a loro volta in ulteriori due sotto scenari per la valutazione degli impatti ambientali a seconda che si abbia o meno il riciclaggio del materiale demolito. Il tutto risulta definito in maniera tale per cui si rispettino i minimi di riciclaggio imposti dalla direttiva europea 2008/98/CE. Tale direttiva entrerà in vigore nei paesi membri dell'Unione Europea a partire dal 2020. Il riciclaggio porterà al riutilizzo del materiale che potrà essere impiegato nella nuova struttura o per altri scopi in opere differenti.

Una parte fondamentale dell'analisi LCA è l'analisi di inventario (*Life Cycle Inventory Analysis*, LCI); tramite essa si andranno ad evidenziare tutti gli aspetti, quali materiali, fattori, ed energie che costituiscono l'analisi vera e propria identificando i flussi di materia ed energia in entrata e uscita (input e output). La raccolta dei dati è infatti un passo fondamentale.

Tutte le varie informazioni ottenute saranno poi implementate sul software SimaPro 8.4. L'operazione di raccolta dei dati non è però semplice. Per avere un'analisi precisa e accurata occorre far riferimento al maggior numero di dati possibile. La soluzione migliore sarebbe quella di ottenere i dati direttamente dalla fonte (dati primari, maggior precisione); tuttavia ciò non è spesso possibile. Laddove i dati primari non siano disponibili occorrerà far riferimento a dati secondari (database, minor accuratezza per i processi considerati). L'analisi d'inventario risulta essere difatti l'analisi che solitamente richiede i maggiori sforzi sia tutta l'analisi e risulta tanto più complessa quanto più elaborati sono i processi e le informazioni. Per avere una chiara rappresentazione del processo lavorativo l'analisi dovrà essere inoltre accompagnata da una rappresentazione grafica: un diagramma di flusso. Tale diagramma è un modello, approssimato, della realtà che si vuole spiegare e che scandisce gli scambi che avvengono in tutte le fasi del sistema. Per tutti i processi che saranno racchiusi all'interno dei confini del sistema occorrerà considerare i flussi elementari di input e output (emissioni o risorse) e i flussi di rifiuti prodotti (acque reflue, rifiuti solidi o liquidi). Lo smaltimento avverrà tramite il trasporto in discarica (nel caso di non riciclo) oppure presso appositi centri per lo smaltimento e riciclaggio.

3.1 Edificio oggetto dello studio

L'edificio preso in esame come caso studio del presente lavoro di tesi è situato in via Castelgomberto 35, nella periferia sud di Torino (Figura 3.1). Si tratta di un palazzo di 9 piani fuori terra con ossatura in cemento armato, realizzato tra il 1957 e il 1959 (Figura 3.2).

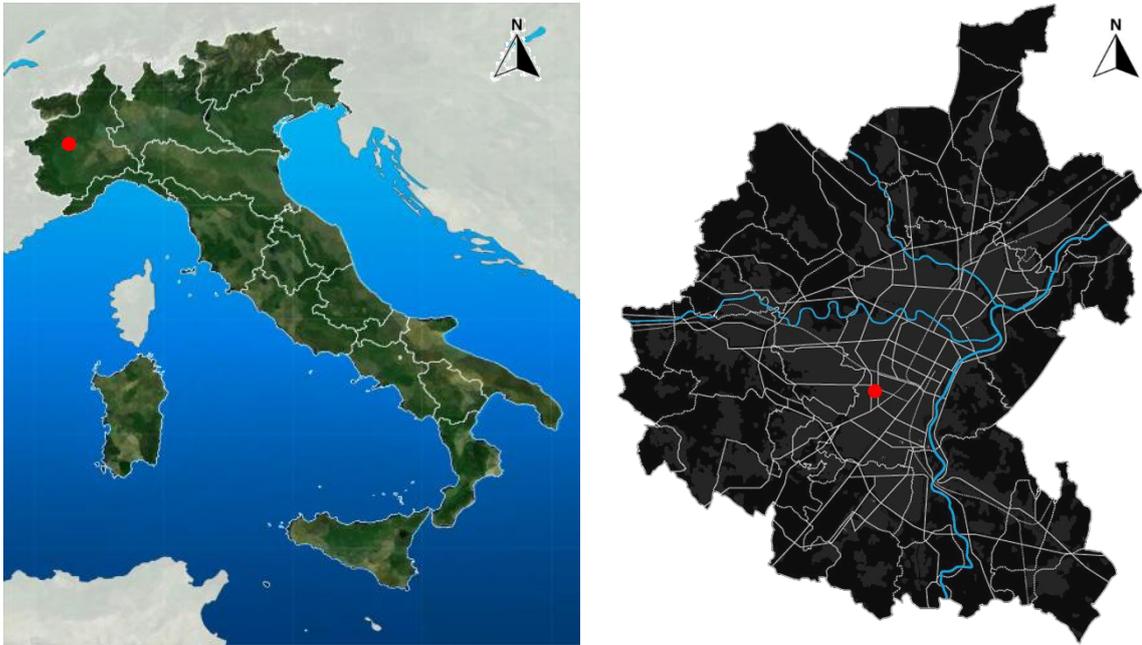


Figura 3.1: Geolocalizzazione su scala nazionale e cittadina dell'edificio



Figura 3.2: Foto dell'edificio oggetto dello studio

3.1.1 Piano INA-Casa

L'edificio analizzato fa parte di un progetto di sviluppo ambizioso avviato a partire dal secondo dopoguerra noto come piano "Fanfani" INA-Casa. Nel luglio del 1948 il Ministro del Lavoro Amintore Fanfani (Governo De Gasperi V) presentò un disegno di legge per incrementare la costruzione di case per lavoratori approvato 8 mesi dopo, nel febbraio del 1949. Nel 1° aprile dello stesso anno prese avvio il progetto INA-Casa che continuò fino al febbraio del 1963 [18].

Si tratta di un intervento dello Stato svolto a realizzare un'edilizia pubblica su tutto il territorio nazionale tramite fondi gestiti presso l'Istituto Nazionale delle Assicurazioni (INA). Il piano doveva essere finanziato da un sistema misto al quale dovevano partecipare lo Stato, i datori di lavoro e i lavoratori dipendenti stessi tramite una ritenuta sul salario mensile (programma di solidarietà nazionale). L'obiettivo consisteva nel far fronte al disagio delle migliaia di disoccupati incrementando l'occupazione operaia e, al tempo stesso, agevolando la realizzazione di case per i lavoratori. Si è voluto dunque rilanciare l'edilizia, con l'assorbimento di un considerevole numero di disoccupati, creando abitazioni per le famiglie a basso reddito. Tale operazione ha permesso di migliorare le condizioni di vita di migliaia di famiglie accrescendo la qualità dell'edilizia popolare italiana allontanandola dai modelli razionalisti del Ventennio fascista. Nel luglio del 1949 si inaugura il primo cantiere a Colleferro (Roma); nello stesso anno saranno 649 i cantieri aperti realizzando una media di 2.800 appartamenti a settimana [18]. Inoltre, si diede la possibilità di realizzare la loro forma di espansione delle città ad oltre 5 mila tra architetti e ingegneri (pari un terzo di quelli presenti all'epoca in Italia). Nei primi 7 anni di lavoro vennero investiti 334 miliardi di lire e alla fine dei 14 anni di lavori saranno realizzati complessivamente circa 2.000.000 vani per un totale di 355.000 alloggi. Nel complesso il piano INA-Casa riguarderà circa 20.000 cantieri su tutto il territorio nazionale impiegando una media di 41.000 lavoratori edili all'anno [18]. Una volta realizzati gli alloggi questi venivano assegnati alle famiglie o in locazione o in riscatto; in tal caso dovevano passare 25 anni prima del passaggio definitivo di proprietà. Tali abitazioni generalmente venivano realizzate nelle periferie delle città e per evitare che diventassero dei semplici dormitori, dovevano essere integrate nel tessuto cittadino. I quartieri furono perciò dotati di mercati, scuole, luoghi d'incontro, ecc.

A Torino, come nel resto d'Italia, l'INA-Casa contribuì a costruire un fitto tessuto di abitazioni, spesso modeste nelle dimensioni, ma diffuso su tutto il territorio comunale. Nella città di Torino questo progetto si tradusse nella realizzazione dei quartieri della Falchera e di Cep alle Vallette, oltre che nelle case di corso Sebastopoli. Attualmente sono ancora numerosi i complessi del piano INA-Casa presenti nel territorio cittadino e, grazie al programma di sviluppo ad essi associati, non vengono considerati come "depressi" rispetto al resto della città.

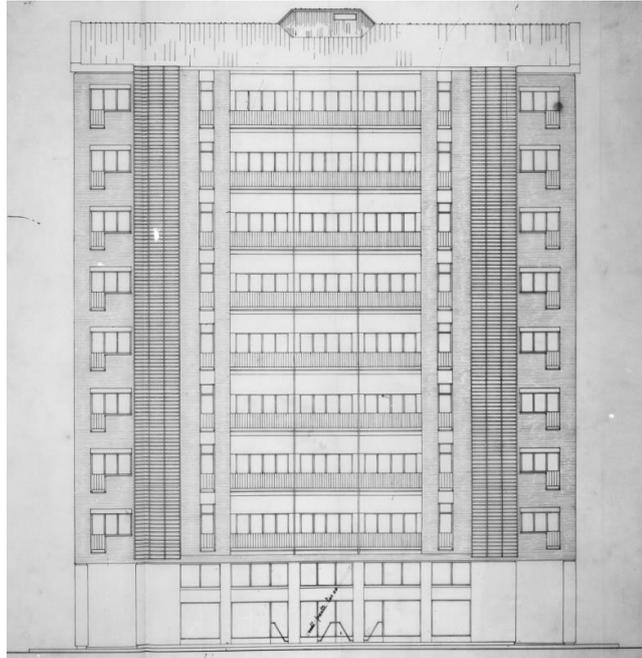


Figura 3.5: Vista frontale dell'edificio (Fonte: archivio Dolza)

Le imprese edili a cui invece vennero affidate le operazioni di costruzione furono: la Milanese Costruzioni per il lotto 1, la S.A.I.C.C.A. per il lotto 2 e il lotto 4 e la Bottoli Comm. Giulio per il lotto 3. Occorre precisare che durante le operazioni di collaudo l'impresa S.A.I.C.C.A. fallì con conseguenti problemi nelle ispezioni delle opere.

Nei quattro lotti sono presenti 44 edifici per un totale di 816 alloggi e 36 negozi. Gli edifici erano caratterizzati da strutture a torre o a schiera. Il palazzo oggetto dello studio (struttura a torre), situato in via Castelvomberto 35, fa parte del cantiere 10951 (secondo lotto). In tale cantiere erano previsti 6 edifici per un totale di 220 alloggi. I lavori iniziarono il 31 dicembre del 1957 e la data prevista per i fine lavori era 360 giorni dopo. Il palazzo venne ultimato nel 1959 e con esso tutti gli altri edifici inclusi in quel lotto. L'intero quartiere poteva dirsi terminato nel 1960 quando tutte le 816 famiglie che avevano prenotato l'abitazione vi andarono a vivere (Figura 3.6).



Figura 3.6: Veduta del complesso di edifici (Fonte: fondi Eugenio e Carlo Mollino, Politecnico di Torino)

3.1.3 Materiali costituenti l'edificio

Il progetto originario dell'edificio oggetto di studio è stato reperito presso l'Archivio di Stato del Comune di Torino - Sezione Pratiche Cemento Armato (Figure 3.7, 3.8 e 3.9). Nelle immagini seguenti vengono mostrati gli schemi strutturali del primo piano e le disposizioni delle armature nelle travi, utili per la modellazione strutturale dell'edificio. Oltre a ciò, sono state analizzate anche le planimetrie delle fondazioni, delle scale, del tetto e tutti gli schemi di disposizione delle armature delle travi.

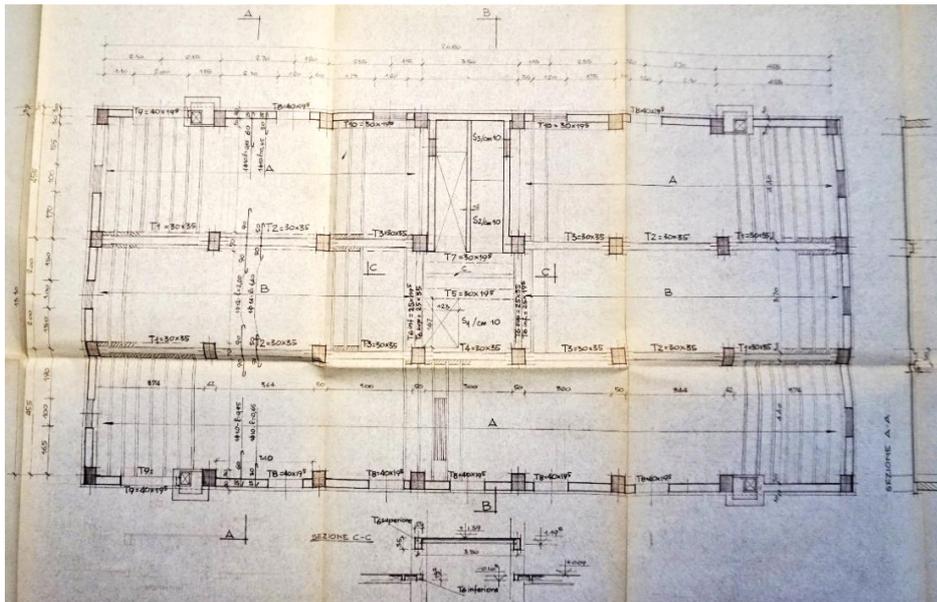


Figura 3.7: Planimetrie strutturali 1° piano (Fonte: Archivio di Stato del Comune di Torino)

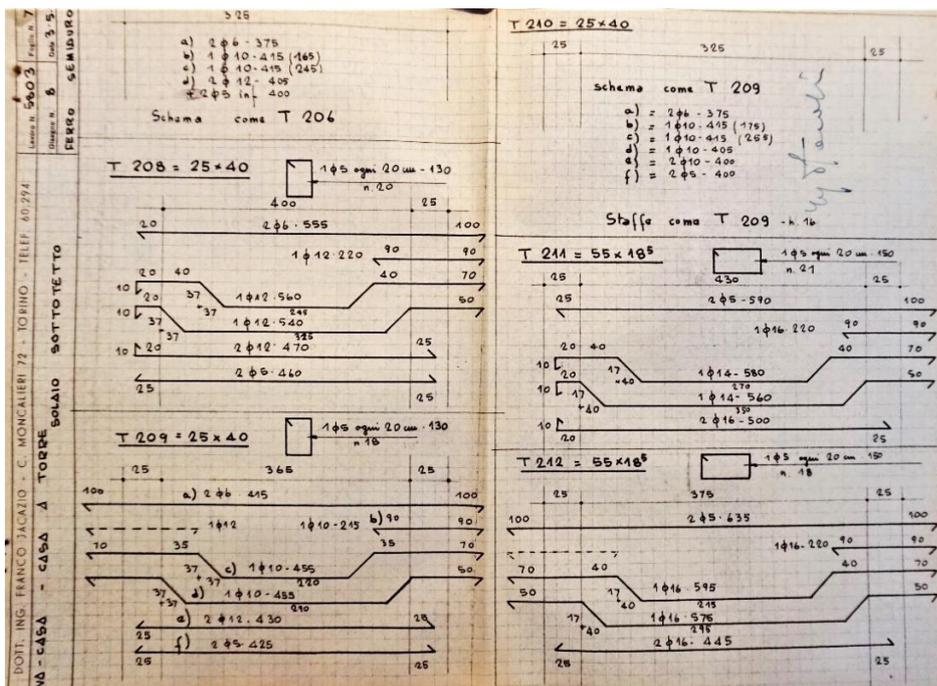


Figura 3.8: Disposizione armature nelle travi (Fonte: Archivio di Stato del Comune di Torino)

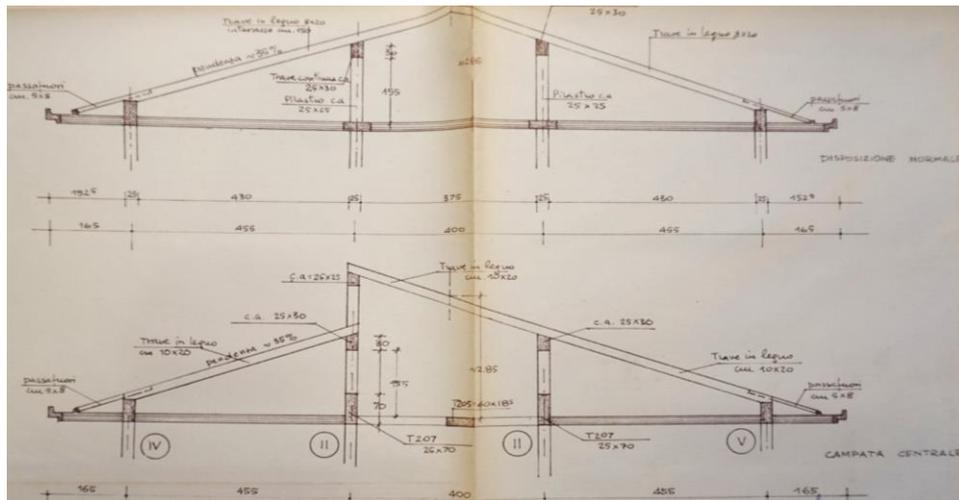


Figura 3.9: Schema copertura (Fonte: Archivio di Stato del Comune di Torino)

Tramite la digitalizzazione di tali planimetrie, in aggiunta alle foto dell'edificio, è stato possibile realizzarne una rappresentazione grafica tridimensionale per mezzo del software Revit (Figura 3.10).



Figura 3.10: Rappresentazione grafica dell'edificio in esame

L'edificio in questione è alto 31.4 m e in pianta misura 26.8 m per 13.1 m. La superficie occupata è di 382.8 m². La configurazione strutturale è molto semplice con una pianta regolare. Presenta degli sbalzi aperti (balconi) e degli sbalzi chiusi (cucine) per tutta

l'elevazione della struttura. Internamente all'edificio sono invece presenti un vano scala e un vano ascensore. Occorre prestare particolare attenzione al piano terra dell'edificio (piano debole) il quale risulta caratterizzato da un'altezza d'interpiano (5.2 m) maggiore rispetto ai piani superiori (3.27 m) e dall'assenza di qualsivoglia elemento di rinforzo.

Per l'esecuzione dell'analisi LCA risulta necessario conoscere il quantitativo di materiale coinvolto in termini di volume [m³] e di peso [t]. A tal proposito, la rappresentazione digitale risulta essenziale per l'esecuzione delle analisi, dovendo investigare i vari quantitativi di materiali che costituiscono l'edificio. Tale operazione sarebbe stata estremamente complessa e onerosa in termini computazionali se fosse stata eseguita solo a partire dalla documentazione cartacea poiché si sarebbe dovuto calcolare manualmente il volume di ogni singolo elemento. Tramite il software Revit è infatti possibile ricavare delle tabelle, esportabili su Excel, a partire dalle quali identificare le informazioni rilevanti per l'analisi come area, spessore, volume; inoltre, aggiungendo i pesi specifici dei materiali per unità di volume o superficie è possibile ricavarne anche il relativo peso.

L'edificio ha una struttura portante costituita da travi e pilastri in cemento armato di cui si conoscono i volumi di cemento e acciaio. A partire dal modello della struttura sono noti anche tutti i volumi degli altri materiali presenti all'interno dell'edificio: vetro, mattoni, materiali ceramici e legno, come mostrato nella tabella seguente (*Tabella 3.1*).

Tabella 3.1: Volumi e pesi dei materiali costituenti la struttura originale

Materials	Volume [m³]	Mass [ton]	Reference
Reinforcing steel	4.07	31.98	Primary data
Glass	1.24	2.07	Primary data
Brick	1 645.82	2 046.15	Primary data
Ceramic tile	303.80	96.04	Hypothesis
Wood	14.72	8.83	Hypothesis
Concrete	449.13	1 077.91	Primary data
Total	2 418.78	3 262.99	

In tale tabella si indicano con "*Primary data*" i valori ottenuti dal modello digitale; con "*Hypothesis*" si indicano invece i valori stimati a partire dal modello (dipendenti dalle varie configurazioni interne).

3.2 Software impiegato: SimaPro 8.4

Un'analisi LCA, per poter essere eseguita, necessita di appositi software di calcolo per la creazione di modelli del ciclo vita a partire dal quale sarà possibile valutare i possibili impatti ambientali.

Per l'esecuzione del seguente lavoro di tesi si è fatto riferimento al software SimaPro 8.4. Si tratta di uno dei software più utilizzati a livello internazionale per l'analisi LCA sviluppato dalla Pré Sustainability [19]. Il seguente software, così come molti altri devono essere conformi alle norme ISO 14040 e ISO 14044.

Lo studio LCA si basa sulla necessità di lavorare su un insieme di dati consistente e, al tempo stesso, attendibile. L'analisi sarà tanto più precisa e accurata quanto maggiori saranno le informazioni a disposizione. I dati per uno studio LCA dovrebbero essere raccolti presso la fonte o il committente. Tale operazione risulta però spesso difficile a causa dell'indisponibilità delle aziende a distribuire dati relative a consumi e produzioni di rifiuti. Nel caso in cui i dati reperiti non siano sufficienti ci si può riferire a specifiche banche dati per LCA.

Nel software sono presenti differenti database che permettono di scegliere il processo o il materiale più idoneo per lo studio che si deve effettuare. Il database a cui si è fatto riferimento per tale lavoro è stato Ecoinvent 3, uno dei più completi e attendibili, specialmente per quanto riguarda le valutazioni LCA che interessano le regioni europee. La seguente banca dati, sviluppata grazie ad una collaborazione con istituzioni svizzere, descrive più di 10.000 differenti processi nei differenti settori industriali. Le categorie considerate sono molto varie e riguardano principalmente:

- energia (elettricità e carburanti);
- trasporti;
- materiali da costruzione;
- agricoltura;
- prodotti chimici;
- sistemi di trattamento e smaltimento dei rifiuti;
- detersivi;
- prodotti plastici e cartacei.

Tutti questi prodotti e processi sono dotati di un'ampia documentazione (nome, unità di misura, origine del dato e categoria o sottocategoria di appartenenza). Uno dei vantaggi principali di SimaPro è la sua flessibilità di utilizzo poiché permette di modificare e adattare al caso in esame i processi ed i materiali già presenti all'interno del database. Risulta infatti possibile, nel caso in cui le informazioni del sistema non risultassero essere adeguate, ampliare i confini del sistema stesso.

3.3 Parco macchine

Per l'esecuzione dei lavori, siano essi di demolizione/ricostruzione oppure di riqualificazione, occorre far riferimento ad uno specifico parco macchine con mezzi aventi motore elettrico o diesel. Per tali macchinari occorre definire le ore di attività, oltre al quantitativo di carburante usato durante tali attività così come il volume di materiale trasportato.

Per ogni scenario i veicoli sono classificati in mezzi da demolizione o da costruzione. Occorre inoltre tener presente che il parco macchine è costituito da veicoli di ultima generazione caratterizzati da maggior efficienza e minori consumi. Le caratteristiche tecniche di tali mezzi sono ricavate dalla consultazione di cataloghi forniti dai vari produttori.

Nella tabella seguente (*Tabella 3.2*) sono elencati i vari mezzi impiegati con il corrispettivo nome tecnico e nome utilizzato sul software SimaPro 8.4 per l'esecuzione dell'analisi.

Tabella 3.2: Mezzi impiegati nell'analisi

Mezzo	Azienda produttrice	Nome tecnico	Nome su SimaPro
Escavatore cingolato	Caterpillar	Escavatore Cat® 340	Excavation Hydraulic digger
Pala caricatrice gommata	Caterpillar	Pala gommata piccola Cat® 930M	Excavation skid-steer
Autocarro	Iveco	Stralis X-WAY	Transport
Betoniera	Iveco	Stralis X-WAY Super Loader	Building machine
Martello pneumatico	Bosh	GSH 16-30	Electricity, low voltage
Gru a torre		Type A 661s	Electricity, low voltage

3.3.1 Scenario I

Lo scenario I è caratterizzato da una prima fase di demolizione selettiva dell'intero edificio a cui segue poi la fase di ricostruzione ex novo dell'intera struttura con il rispetto delle attuali norme vigenti.

La fase di demolizione dell'intero edificio è ipotizzata essere di 40 giorni con 8 ore di lavoro per ogni giorno. I mezzi da demolizione, caratterizzati da motore diesel sono classificati a seconda che svolgano la funzione di trasporto (transport) o di raccolta (excavation skid-steer, excavation hydraulic-digger (demolition), excavation hydraulic-digger (excavation)).

Per i mezzi che svolgono la funzione di trasporto è nota, oltre alla posizione dell'edificio, anche la posizione del luogo di riciclaggio/deposito presso la Cavit S.p.a., di conseguenza è nota la distanza percorsa in km. Per i mezzi che svolgono invece la funzione di raccolta è stato invece

ipotizzato un consumo medio orario. Nelle tabelle seguenti (*Tabelle 3.3 e 3.4*) vengono mostrate le varie caratteristiche tecniche e consumi dei mezzi impiegati nella demolizione.

Tabella 3.3: Caratteristiche mezzi da trasporto per la demolizione Scenario I

Demolition vehicles	Dumper
Engine	Diesel
Euro	VI
Days of activity [d]	40
Hours of activity [h]	320
Consumption [l/h]	16
Diesel [l]	5 120
Density Diesel [kg/l]	0.835
Diesel [kg]	4 275
Diesel [MJ]	183 808
Volume [m³]	2 419
Capacity [m³]	20
n° trip	145
Mass [ton]	3 263
Distance [km]	15
ton · km	48 945

Tabella 3.4: Caratteristiche mezzi da demolizione Scenario I

Demolition vehicles	Excavation skid-steer	Excavation Hydraulic digger (demolition)	Excavation Hydraulic digger (excavation)
Engine	Diesel	Diesel	Diesel
Euro	IV	V	V
Days of activity [d]	40	20	20
Hours of activity [h]	320	160	160
Consumption [l/h]	13	14	14
Diesel [l]	4 160	2 240	2 240
Density Diesel [kg/l]	0.835	0.835	0.835
Diesel [kg]	3 474	1 870	1 870
Diesel [MJ]	149 344	80 416	80 416
Volume [m³]	2 340	2 340	1 800

Per l'edificazione della nuova struttura si è preventivato un periodo di costruzione di 2 anni. I mezzi di trasporto in questo caso svolgono la funzione inversa trasportando il materiale dal luogo di stoccaggio al sito di costruzione. Per tale trasporto è stata assunta una distanza generica, poiché l'esatta distanza dal deposito al cantiere dipende dall'impresa costruttrice che realizzerà la struttura. Il trasporto dei materiali generici avverrà mediante autocarro (*Tabella 3.5*), mentre il trasporto del calcestruzzo avverrà mediante l'impiego di una betoniera (*Tabella 3.6*). Entrambi i mezzi sono dotati di motore diesel. Per quanto riguarda la

costruzione in elevazione è invece prevista una gru a torre della quale risulta essere noto il consumo di energia elettrica [kWh] prelevato dalla rete cittadina (Tabella 3.7).

Tabella 3.5: Caratteristiche mezzi da trasporto per la costruzione Scenario I

Construction vehicles	Dumper
Engine	Diesel
Euro	VI
Days of activity [d]	730
Hours of activity [h]	5 840
Consumption [l/h]	16
Diesel [l]	93 440
Density Diesel [kg/l]	0.835
Diesel [kg]	78 022
Diesel [MJ]	3 354 496
Volume [m ³]	2 510
Capacity [m ³]	20
n° trip	151
Mass [ton]	3 490
Distance [km]	20
ton · km	69 805

Tabella 3.6: Caratteristiche gru Scenario I

Construction vehicles	Construction crane
Engine	Electric
Voltage	Low
Consumption [kW]	25
Days of activity [d]	730
Hours of activity [h]	5 840
Total Consumption [kWh]	146 000

Tabella 3.7: Caratteristiche mezzi da costruzione Scenario I

Construction vehicles	Building machine
Engine	Diesel
Euro	V
Days of activity [d]	365
Hours of activity [h]	2 920
Consumption [l/h]	16
Diesel [l]	46 720
Density Diesel [kg/l]	0.835
Diesel [kg]	39 011
Diesel [MJ]	1 677 248
Volume [m ³]	539

3.3.2 Scenario II

Lo scenario II è caratterizzato da una prima fase di demolizione parziale dell'edificio a cui segue poi la fase di riqualificazione mediante la realizzazione di un esoscheletro esterno che permetta di aumentare la stabilità della struttura e al contempo renderla esteticamente migliore.

Per la demolizione parziale della struttura (demolizione tetto e alcune parti di muratura) si è preventivato un periodo di attività di 15 giorni. Le operazioni di demolizione sono effettuate mediante l'impiego di martelli pneumatici elettrici. Il traposto del materiale demolito avverrà, come nello scenario precedente, mediante l'impiego di autocarri. Le caratteristiche tecniche e i consumi sono mostrate nella tabella seguente (*Tabella 3.8 e 3.9*).

Tabella 3.8: Caratteristiche mezzi da trasporto per la demolizione Scenario II

Demolition vehicles	Dumper
Engine	Diesel
Euro	VI
Days of activity [d]	15
Hours of activity [h]	120
Consumption [l/h]	16
Diesel [l]	1 920
Density Diesel [kg/l]	0.835
Diesel [kg]	1 603.2
Diesel [MJ]	68 928
Volume [m³]	32.7
Capacity [m³]	20
n° trip	2
Mass [ton]	56
Distance [km]	15
ton · km	840

Tabella 3.9: Caratteristiche mezzi da demolizione Scenario II

Demolition vehicles	Jackhammer
Engine	Electric
Voltage	Low
Consumption [kW]	1.75
Days of activity [d]	10
Hours of activity [h]	80
Total Consumption [kWh]	140

Per l'edificazione dell'esoscheletro si è previsto un periodo di attività di 4 mesi. Le caratteristiche tecniche e i consumi sono mostrati nelle *Tabelle 3.10, 3.11 e 3.12*.

Tabella 3.10: Caratteristiche mezzi da trasporto per la costruzione Scenario II

Construction vehicles	Dumper
Engine	Diesel
Euro	VI
Days of activity [d]	90
Hours of activity [h]	720
Consumption [l/h]	16
Diesel [l]	11 520
Density Diesel [kg/l]	0.835
Diesel [kg]	9 619
Diesel [MJ]	413 568
Volume [m³]	148.7
Capacity [m³]	20
n° trip	9
Mass [ton]	421.9
Distance [km]	20
ton · km	8 438.4

Tabella 3.11: Caratteristiche gru Scenario II

Construction vehicles	Construction crane
Engine	Electric
Voltage	Low
Consumption [kW]	25
Days of activity [d]	90
Hours of activity [h]	720
Total Consumption [kWh]	18 000

Tabella 3.12: Caratteristiche mezzi da costruzione Scenario II

Construction vehicles	Building machine
Engine	Diesel
Euro	V
Days of activity [d]	5
Hours of activity [h]	40
Consumption [l/h]	16
Diesel [l]	640
Density Diesel [kg/l]	0.835
Diesel [kg]	534.4
Diesel [MJ]	22 976
Volume [m³]	90

3.4 Modalità di riciclo del materiale

L'impatto che l'attività umana ha sull'ambiente è molto elevato e non trascurabile. Da un lato si ha il prelievo ed uso incontrollato delle risorse naturali e dall'altro produzione di notevoli quantitativi di scarto come risultato delle varie attività svolte.

Il Rapporto Rifiuti Speciali 2019, è il risultato di un'attività di raccolta, analisi ed elaborazione di dati da parte del Centro Nazionale dei Rifiuti e dell'Economia Circolare dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), con il contributo delle Agenzie regionali e provinciali per la Protezione dell'Ambiente, in attuazione di uno specifico compito istituzionale previsto dall'art.189 del d.lgs. n. 152/2006. All'interno del seguente rapporto del 2019 sono contenuti gli ultimi dati disponibili sui rifiuti speciali prodotti riferiti all'anno 2017 e dichiarati nel 2018. In tale anno la produzione di rifiuti speciali si attesta a 138,9 milioni di tonnellate con un incremento del 2.9% rispetto all'anno precedente [20].

Tutti i prodotti di scarto sono classificati secondo appositi codici europei dei rifiuti (CER), entrati in vigore nel 2015 secondo la Decisione 2014/955/UE [21]. Gli scarti da costruzione e demolizione sono rifiuti speciali, per i quali deve essere garantita una separazione dalle altre tipologie di rifiuto. Il codice **CER 17** raggruppa tutti i rifiuti delle operazioni di costruzione e demolizione (incluso anche il terreno proveniente da siti contaminati) e una serie di sottoclassi individua nello specifico la natura del materiale di scarto. Il maggior contributo alla produzione di rifiuti speciali è dato proprio dai materiali derivanti dalla demolizione e costruzione e costituiscono il 41.3% (57.4 milioni di tonnellate) del totale prodotto (*Figura 3.11*) [20]. Si tratta di una percentuale non trascurabile considerando i volumi e le masse ad essi associati.

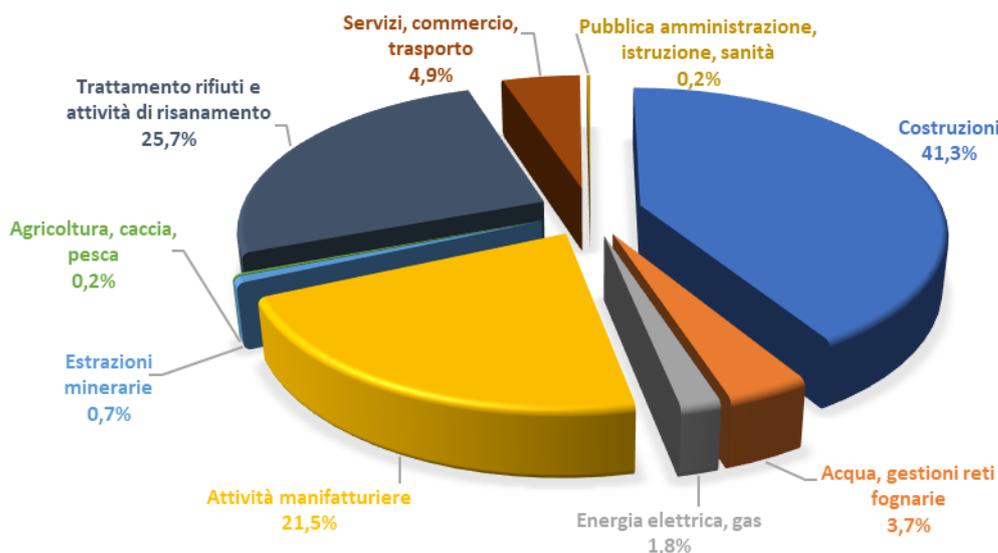


Figura 3.11: Percentuale di produzione rifiuti speciali nei principali settori economici

Relativamente alla sola percentuale di **rifiuti speciali non pericolosi**, la ripartizione delle varie percentuali riflette sostanzialmente la distribuzione dei dati della produzione totale, come del resto è ipotizzabile in considerazione all'elevata incidenza di tale tipologia di rifiuti sul totale dei rifiuti speciali prodotti (93% del quantitativo complessivo).

La maggior percentuale prodotta resta sempre quella legata al settore dell'edilizia (costruzione e demolizione) con il 44.1% (57 milioni di tonnellate) (Figura 3.12) [20].

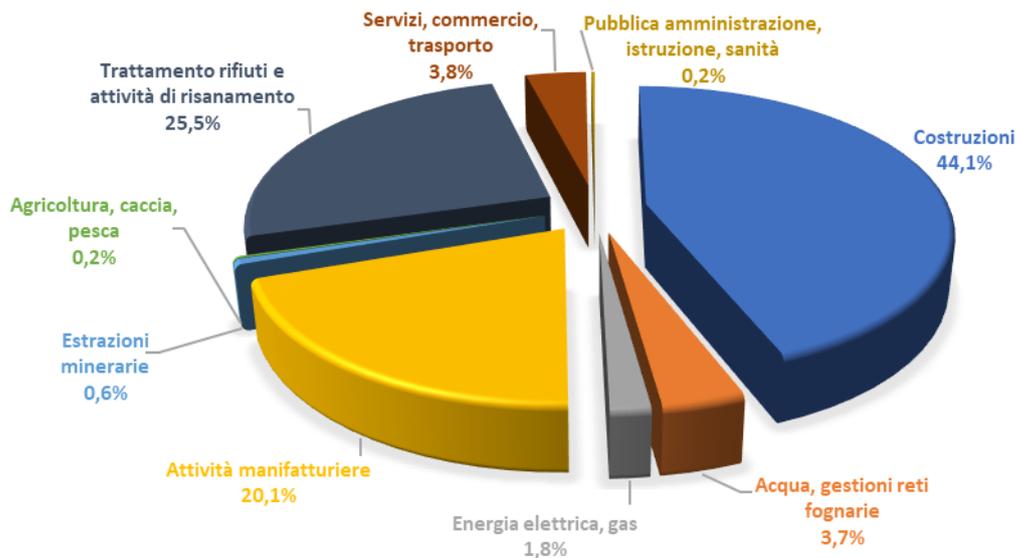


Figura 3.12: Percentuale di produzione rifiuti speciali non pericolosi nei principali settori economici

Per i **rifiuti speciali pericolosi** (7% del quantitativo complessivo) la situazione risulta differente. Per tale tipologia di rifiuti a predominare è il settore manifatturiero (39.7%) mentre il settore edile (rifiuti contenenti amianto, isolanti o altro) ha un impatto ridotto rispetto all'altra tipologia (3.6%) (Figura 3.13) [20].

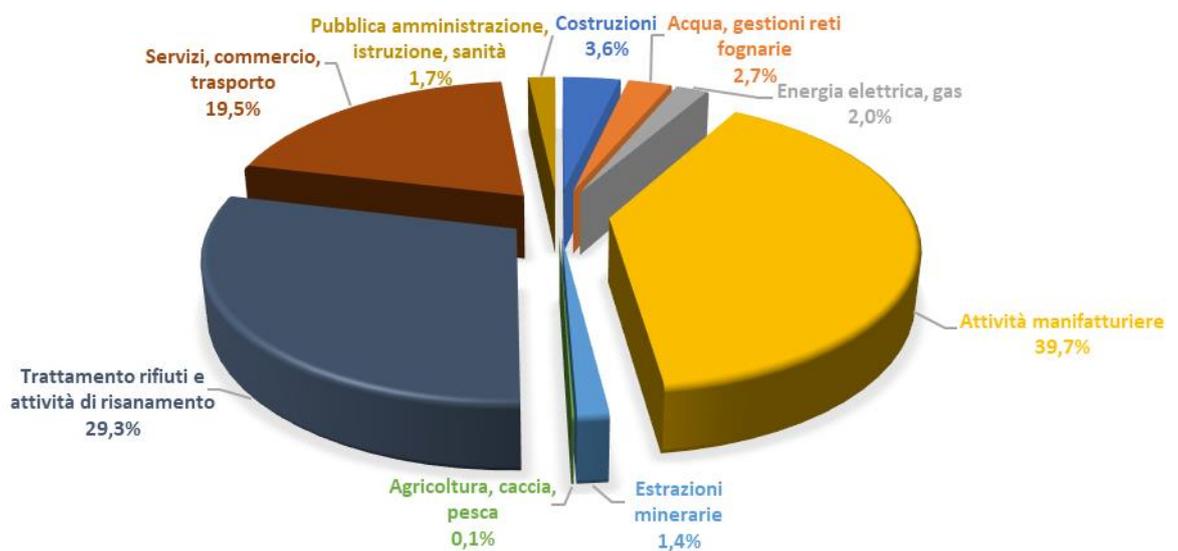


Figura 3.13: Percentuale di produzione rifiuti speciali pericolosi nei principali settori economici

A livello geografico nazionale, a produrre più rifiuti è il Nord Italia con quasi 81 milioni di tonnellate (58.3% del complessivo nazionale), seguito dal Sud con circa 32.9 milioni di tonnellate (23.7%) e dal Centro con 24 milioni di tonnellate (18%). A livello regionale la Lombardia da sola produce il 22.2% di rifiuti speciali, seguita da Emilia-Romagna e Veneto con circa il 10% [20].

Secondo il decreto Legislativo 152/2006 [22] “Norme in materia ambientale” la responsabilità dello smaltimento dei rifiuti edili ricade sul produttore delle macerie, che nella maggior parte dei casi corrisponde all’impresa edile incaricata della costruzione o della demolizione. Il Testo Unico dell’ambiente, infatti, definisce il produttore come “la persona la cui attività ha prodotto rifiuti”. Di conseguenza, spetterà all’impresa la corretta gestione dell’intero iter per lo smaltimento:

- deposito temporaneo in cantiere in aree apposite o in cassoni mobili;
- la comunicazione all’albo dei gestori ambientali;
- l’identificazione dei rifiuti
- il corretto trasporto ad un centro di raccolta e smaltimento autorizzato.

Lo smaltimento di questi rifiuti, inoltre, dev’essere gestito esclusivamente da imprese correttamente iscritte all’Albo Nazionale dei Gestori Ambientali, motivo il quale risulta possibile per un’impresa edile o un soggetto privato delegare a imprese competenti e specializzate l’operazione dello smaltimento. Il settore della costruzione richiede ingenti quantitativi di risorse naturali e per ridurre l’impatto ambientale è importante valutare una strada alternativa al semplice smaltimento dei rifiuti in centri autorizzati (discariche). L’obiettivo è trasformare gli scarti in risorse.

L’operazione di riciclaggio permette di ridurre l’ingombro nelle discariche favorendone il riutilizzo oltre ad una riduzione dell’inquinamento ambientale e impoverimento delle materie prime. Le modalità e operazioni di riciclo sono differenti a seconda della tipologia di materiale da dover trattare; questi dovranno essere precedentemente separati tramite un’operazione di demolizione selettiva. Tale tipologia di demolizione, benché presenti dei costi maggiori, è l’approccio migliore e più efficiente. Non tutti i detriti però potranno essere riciclati, una percentuale finirà comunque in discarica; lo scopo principale è ridurre al minimo questa percentuale. Bisogna tenere a mente che anche il processo di riciclo dei rifiuti produce rifiuti. Secondo i dati, per i rifiuti, sono prospettati quattro possibili trattamenti [20]:

- il 67.4% sono riciclati con recupero di materia;
- l’8.2% sono conferiti in discarica;
- il 10.9% hanno subito ulteriori operazioni di smaltimento;
- il 2.3% sono sottoposti ad incenerimento o coincenerimento.

Occorre però precisare che le normative vigenti sono molto restrittive sul riuso del materiale riquilificato (es. aggregati ottenuti da riciclo per nuovi calcestruzzi); per effetto di ciò solo una parte di questo materiale può essere reimpiegato nella nuova struttura, la restante quota parte di tale materiale potrà essere impiegata per altri scopi in altre opere. Nella *Tabella 3.13* sono mostrate le percentuali di riciclaggio adottate per l'analisi; queste sono poi a loro volta suddivise a seconda del riutilizzato previsto per quel tipo di materiale.

Tabella 3.13: Percentuali di riciclaggio

Materials	Recycling [%]	Reused in the same structure [%]	Other reuse [%]
Reinforcing steel	100	93	7
Glass	100	0	100
Brick	80	0	80
Ceramic Tile	80	0	80
Wood	100	13	87
Concrete	95	30	65

L'obiettivo prefissato dalla comunità europea tramite la Direttiva 2008/98/CE (raggiungimento di almeno il 70% del riciclo degli scarti edili entro il 2020) è molto ambizioso ed è divenuto già realtà in molti paesi dell'Unione (Olanda, Germania, Belgio). In questo ambito l'Italia sta crescendo molto anche se ancora lentamente. Basti pensare che la direttiva è stata recepita in Italia tramite il Dlgs 205/2010 e fino al 2015 si riciclava solo il 10% dei rifiuti edili [16]. Secondo il rapporto ISPRA/SNPA 2019 la percentuale di rifiuti riciclati è in aumento e al contempo diminuisce la percentuale di rifiuti destinati alla discarica. L'economia circolare in edilizia non è però ancora molto attiva. Mancano le strutture e gli impianti necessari al trattamento dei rifiuti; a tal proposito una quota parte dei rifiuti viene spedita all'estero per essere trattata con un costo molto elevato.

Nel seguente lavoro il riciclaggio è stato valutato sui materiali principali che definiscono un edificio:

- acciaio per armature, contenuto in tutti gli elementi strutturali
- vetro, presente sugli infissi esterni
- mattoni, costituente gli elementi di muratura di separazione tra interno ed esterno ed i vari ambienti interni;
- materiali ceramici, quali piastrelle e tegole;
- legno, costituente gli infissi e le capriate della copertura;
- calcestruzzo, costituente tutti gli elementi portanti.

Nell'edificio in esame non sono presenti materiali pericolosi (amianto) per i quali si sarebbero dovute adottare delle procedure di smaltimento differenti.

Acciaio da armature

L'acciaio è un materiale molto versatile che per via della sua natura può essere riciclato infinite volte senza perdere le proprietà originarie. Il ciclo vita dell'acciaio è potenzialmente senza fine. Tale proprietà viene indicata sinteticamente con il termine *up-cycling*, per creare una distinzione con i materiali che sono soggetti a decadimento delle proprietà (*down-cycling*). Terminata la vita utile del manufatto in cui è inserito un elemento in acciaio quest'ultimo può essere ricondotto in fonderia per essere nuovamente lavorato. Il rottame può essere trasformato in un altro prodotto per mezzo di particolari processi con forno elettrico ad arco. L'energia necessaria per produrre una tonnellata di acciaio austenitico per armature con materiali vergine è di 79GJ. Produrre la medesima tonnellata secondo le attuali operazioni di produzione è di 53GJ. Con materiale totalmente riciclato l'energia richiesta per tale produzione è ancora più bassa: 26GJ. Il risparmio energetico derivante da riciclaggio è notevole. In eguale misura importanti sono anche le riduzioni nelle emissioni di CO₂ per produrre tale tonnellata: rispettivamente 5.3, 3.6 e 1.6 tonnellate [23].

L'energia totale necessaria per fondere e riprodurre acciaio nei due scenari è mostrata nella *Tabella 3.14*.

Tabella 3.14: Massa e consumi energetici per riciclo dell'acciaio

	Mass [t]	Energy [MJ]
Scenario I Consequential	31.98	831 584.00
Scenario II Consequential	3.93	102 050.00

Vetro

Il vetro, in maniera analoga all'acciaio, può essere riciclato innumerevoli volte senza perdere le sue proprietà e caratteristiche. Il vetro è un materiale "pulito" poiché non è prodotto con sostanze inquinanti. Il riciclo del vetro consente di ottenere un notevole risparmio di energia per le operazioni di estrazione, trasporto e fusione delle materie prime (sabbie silicee e carbonato di calcio). Il rottame di vetro può infatti essere rifuso e aggiunto nella miscela vetrificabile abbassando la temperatura necessaria per la fusione per la produzione del nuovo materiale (minor consumo di energia e minori emissioni). Ogni tonnellata di rottame rifuso permette di risparmiare 1.2 tonnellate di materie prime e circa 100 kg di combustibile. In termini di energia il vantaggio, derivante dall'impiego del rottame vetroso in una nuova produzione, permette di risparmiare 600MJ/t rispetto ad una produzione senza riciclaggio[24]. L'energia risparmiata riciclando tutto il vetro dell'edificio nei due scenari è mostrata nella *Tabella 3.15*.

Tabella 3.15: Massa e consumi energetici per riciclo del vetro

	Mass [t]	Energy [MJ]
Scenario I Consequential	2.07	-1 241.40
Scenario II Consequential	2.07	-1 241.40

Mattoni e materiali ceramici

I mattoni, così come i materiali ceramici che costituiscono le pavimentazioni e il tetto, rappresentano la componente più volumetrica delle macerie edili. Si tratta di un materiale molto ingombrante che non si può prestare a particolari riusi. Una soluzione per il relativo trattamento è quella della frantumazione. I detriti così ottenuti potranno essere uniti a calcestruzzi e conglomerati bituminosi, anch'essi derivanti da demolizione e triturazione, per realizzare il sottofondo stradale.

Per la frantumazione di tali materiali si fa riferimento al metodo ordinario di riciclaggio OCR (*Ordinary Recycling Process*) e l'energia necessaria per l'esecuzione di tale operazione è di 36.99 MJ/t [25]. L'energia totale spesa nei due scenari perché ciò avvenga è mostrato nella Tabella 3.16.

Tabella 3.16: Massa e consumi energetici per riciclo dei materiali ceramici

	Mass [t]	Energy [MJ]
Scenario I Consequential	1 713.76	63 391.80
Scenario II Consequential	28.00	1 035.72

Un'alternativa alla frantumazione per il riciclo di tali materiali può essere il *Rebrick*. Si tratta di una procedura che consente il riutilizzo di mattoni ancora integri recuperati da strutture demolite. Si andrà così a ridurre la produzione di nuovi mattoni con conseguente riduzione del consumo di energia, di emissioni e di spreco di materie prima. La tecnologia, che è stata progettata e brevettata dalla società danese Gamle Mursten, è costituita da un sistema meccanico che pulisce automaticamente calcestruzzo e malta dai vecchi mattoni. I mattoni possono quindi essere riutilizzati in nuove strutture senza essere svalutati e utilizzati all'interno di aggregati misti. Per mezzo di tale operazione risulta possibile abbattere le emissioni di CO₂ e la produzione di rifiuti. Ogni mattone riutilizzato farà risparmiare infatti 0,5 kg di emissioni di CO₂ rispetto al produrlo di meno [26].

Legno

Il legno è un materiale organico in grado di riprodursi naturalmente, è inoltre biodegradabile e può essere totalmente recuperabile. Il legno viene triturato in piccoli pezzi detti *cips*. Il semilavorato ottenuto viene amalgamato con resine e pressato a caldo o freddo dando luogo a pannelli di legno di varie misure. L'energia necessaria per la triturazione e produzione del nuovo materiale è di 62.10 MJ/t [27]. L'energia totale necessaria per riqualificare il legno dei due scenari è mostrata nella seguente tabella (Tabella 3.17). In alternativa a questa procedura, quando il legno non è adatto al riciclo, può essere incenerito nel termovalorizzatore (produzione di calore ed energia). È sconsigliato invece il deposito in discarica a causa della produzione di biogas (metano e CO₂) prodotto durante la degradazione.

Tabella 3.17: Massa e consumi energetici per riciclo del legno

	Mass [t]	Energy [MJ]
Scenario I Consequential	7.69	477.27
Scenario II Consequential	2.61	162.08

Calcestruzzo

Il calcestruzzo, una volta separato dall'acciaio viene frantumato e trasformato in aggregato con differenti pezzature. Il calcestruzzo inteso come maceria risulta essere un materiale molto ingombrante e per via della sua natura stessa di materiale già legato non si può prestare a molti utilizzi. Una volta frantumato può essere impiegato come aggregato per nuovi conglomerati cementizi. La percentuale con la quale può essere impiegato non è però elevata ed è dipendete dalla classe di resistenza del nuovo calcestruzzo che si vuole ottenere come stabilito nel Capitolo 11.2.9.2 dalla norma tecnica delle costruzioni NTC 2018 [28] (Tabella 3.18).

Tabella 3.18: Percentuale di riuso del calcestruzzo secondo la NTC 2018

Origine del materiale da riciclo	Classe del calcestruzzo	Percentuale di impiego
Demolizioni di edifici (macerie)	= 8/10	fino al 100%
Demolizioni di solo calcestruzzo e c.a. (frammenti di calcestruzzo ≤ 90%, UNI EN 933-11:2009)	≤ 20/25	fino al 60%
	≤ 30/37	≤ 30%
	≤ 45/55	≤ 20%
Riutilizzo di calcestruzzo interno negli stabilimenti di prefabbricazione qualificati - da qualsiasi classe	Classe minore del calcestruzzo di origine	fino al 15%
	Stessa classe del calcestruzzo di origine	fino al 10%

La classe di resistenza che si è considerata è C30/37 con percentuale massima di aggregato utilizzabile: 30%. In alternativa all'utilizzo come aggregato può essere impiegato, assieme a mattoni e materiali ceramici triturati, come sottofondo per le opere stradali.

Il calcestruzzo è un conglomerato più duro della semplice roccia e il dispendio di energia necessario per la sua frantumazione risulta essere importante. Tale condizione svantaggiosa è però bilanciata da due aspetti più favorevoli: come prima cosa si evita lo sbancamento delle montagne per la produzione di nuovi aggregati; inoltre, come detto, essendo il calcestruzzo un materiale ingombrante presente in grande quantità nelle macerie, se ne riduce il relativo deposito nella discarica.

Per la frantumazione del calcestruzzo si possono impiegare differenti metodologie più o meno complesse. Il metodo preso in esame è quello termomeccanico del riscaldamento e sfregamento HRM (*Heating and Rubbing*). Il processo in esame è composto da varie operazioni intermedie come mostrato in *Figura 3.14*.

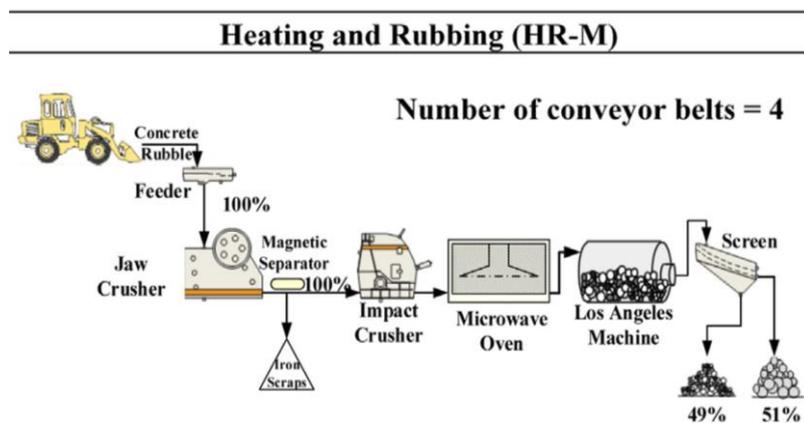


Figura 3.14: Fasi del processo Heating and Rubbing [25]

L'energia necessaria per l'esecuzione di tale procedura è di 45 MJ/t [25]. L'energia totale necessaria per frantumare tutto il quantitativo di calcestruzzo dei due scenari è mostrata *Tabella 3.19*.

Tabella 3.19: Massa e consumi energetici per riciclo del calcestruzzo

	Mass [t]	Energy [MJ]
Scenario I Consequential	1 024.02	46 213.86
Scenario II Consequential	11.40	514.48

3.5 Scenario I

Lo Scenario I valuta ciò che accade demolendo interamente l'edificio e ricostruendolo senza che si abbia il riciclo del materiale demolito, ovvero che tutte le macerie dall'edificio vengano trasferite direttamente alla discarica. Tutte le fasi di lavoro sono mostrate nel diagramma di flusso sottostante (Figura 3.15).

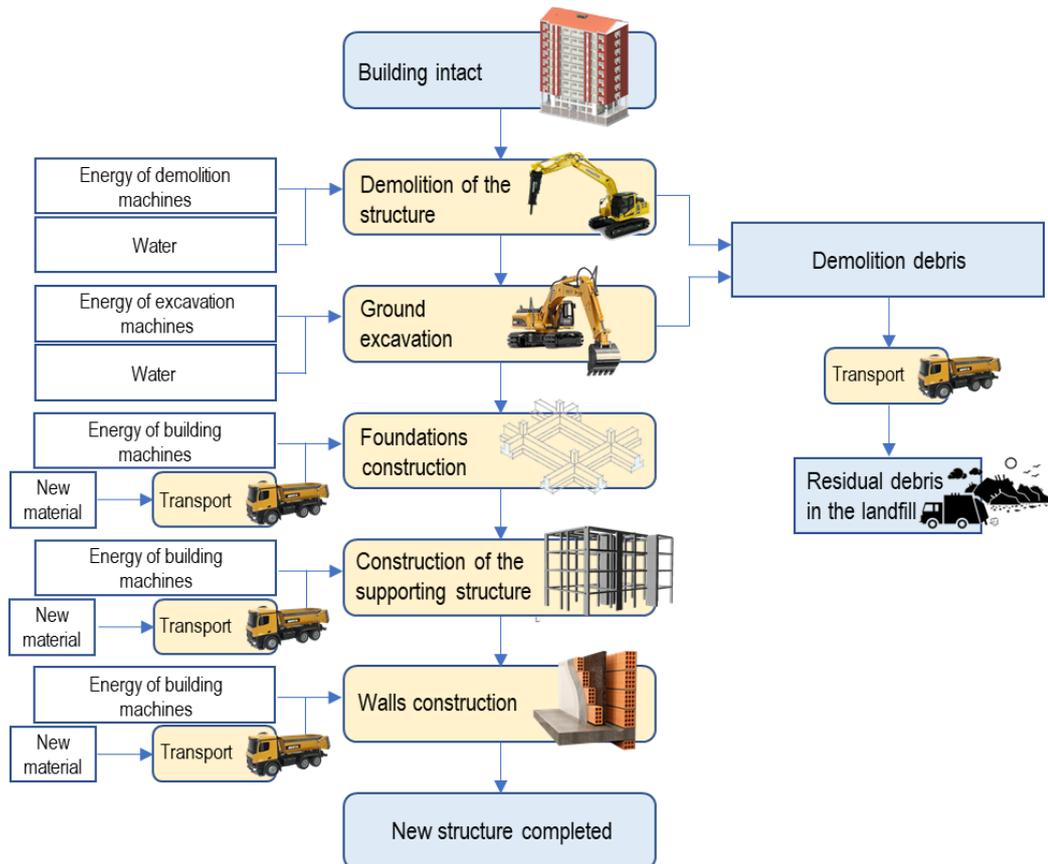


Figura 3.15: Diagramma di flusso Scenario I

L'analisi parte dall'edificio intatto a cui segue la fase di demolizione. Tale fase sarà eseguita mediante l'impiego di un escavatore dotato di martello pneumatico i cui consumi sono indicati nella Tabella. Durante la demolizione, per evitare un eccessivo rilascio di polvere, le macerie dovranno essere bagnate. Tutti i detriti verranno poi trasportati, tramite appositi autocarri (Tabella 3.3) presso il luogo di discarica.

Dopo che l'intero sito è stato sgombrato dalla struttura originaria si passa alla realizzazione degli scavi che ospiteranno le fondazioni del nuovo edificio. Tale operazione è eseguita mediante escavatore e pala caricatrice (Tabella 3.4). Per l'esecuzione dello scavo il terreno dovrà essere inumidito tramite l'impiego di acqua e la quota parte di terreno che non verrà riusata per il rinterro verrà trasportata alla discarica.

Le fasi successive riguardano la costruzione vera e propria della struttura, dalla realizzazione delle fondamenta alla struttura portante fino alle componenti di muratura. Tutte queste operazioni sono eseguite mediante una gru a torre (*Tabella 3.6*), betoniera (*Tabella 3.7*) e autocarri per il trasporto del nuovo materiale (*Tabella 3.5*).

Nella *Tabella 3.20* vengono mostrati i quantitativi di materiali che sopraggiungeranno alla discarica.

Tabella 3.20: Quantitativo di materiale alla discarica Scenario I

Materials	Recycling [%]	Volume [m ³]	Mass [ton]
Reinforcing steel	0	4.07	31.98
Glass	0	1.24	2.07
Brick	0	1 645.82	2 046.15
Ceramic Tile	0	303.80	96.04
Wood	0	14.72	8.83
Concrete	0	449.13	1 077.91
Total Landfill volume			2 418.78
Total Landfill mass			3 262.99
% Recycled mass			0.00

Poiché non si ha alcun riciclo del materiale, tutte le macerie verranno trasportate alla discarica.

Una volta che il sito è stato completamente smantellato, è possibile procedere alla realizzazione della nuova struttura. L'ipotesi che si effettua è che il nuovo edificio mantenga le medesime proporzioni dell'edificio precedente (conformazione e area). A tal proposito i nuovi materiali sono stimati incrementando le masse e i volumi del vecchio edificio (specialmente per quanto riguarda acciaio, calcestruzzo e vetro) in maniera tale da rendere la struttura sicura (rispetto norme) ed energeticamente efficiente. Di tale nuovo edificio sono stimati i quantitativi di materiale, come mostrato nella *Tabella 3.21*.

Tabella 3.21: Quantitativo di materiale necessario per una nuova struttura Scenario I

Materials	Volume [m ³]	Mass [ton]	Reference
Reinforcing steel	5.29	41.58	Hypothesis
Glass	1.66	4.14	Hypothesis
Brick	1 645.82	2 046.15	Hypothesis
Ceramic Tile	303.80	96.04	Hypothesis
Wood	14.72	8.83	Hypothesis
Concrete	538.96	1 293.49	Hypothesis
Total new volume		2 510.25	
Total new mass		3 490.24	

In assenza di riciclo di materiale l'edificio sarà realizzato con materiali di nuova produzione.

3.6 Scenario I Consequential

Lo scenario I Consequential presenta le medesime fasi costruttive dello scenario I, la sola differenza si riscontra nella modalità con la quale vengono trattate le macerie. Una sostanziosa quota parte viene riciclata (almeno il 70% come imposto dalla direttiva 2008/98/CE) e la restante parte, non riciclabile, verrà trasportata in discarica. Il trasporto avverrà sempre per mezzo di un autocarro i cui consumi sono noti (Tabella 3.3). Tutte le fasi di lavoro sono mostrate nel diagramma di flusso sottostante (Figura 3.16).

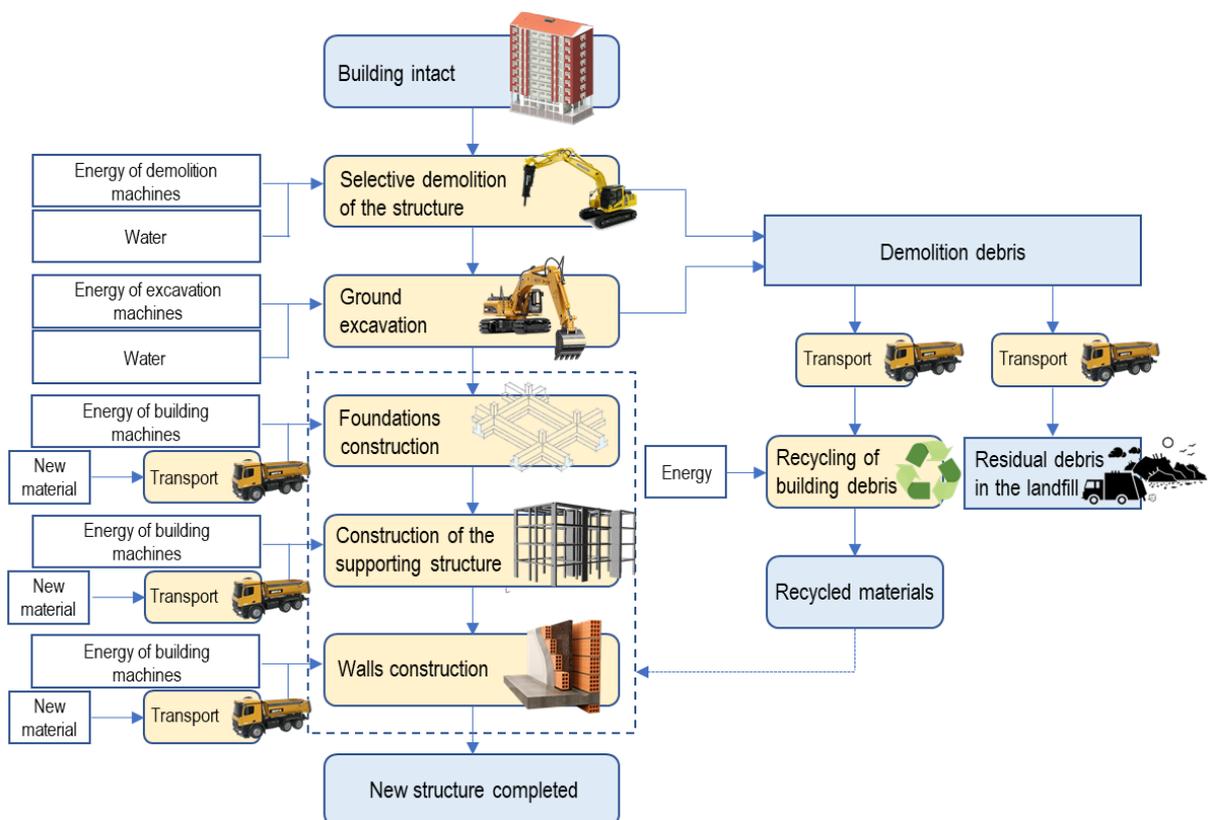


Figura 3.16: Diagramma di flusso Scenario I Consequential

La fase fondamentale di tale scenario è il riciclo del materiale. Le macerie dovranno essere trasportate presso centri autorizzati per il relativo trattamento. Le operazioni di riciclaggio sono complesse e differenti a seconda della tipologia di materiale da trattare; inoltre affinché si possa effettuare il riciclo sarà necessario un certo dispendio di energia come detto nel Capitolo 3.4. Per mezzo di tale operazione si otterrà un nuovo materiale. L'ipotesi che si effettua è che una parte di tale materiale possa essere reimpiegato nella nuova struttura (reintrodotto nel ciclo), mentre la rimanente quota parte di materiale riciclato potrà essere impiegato per altri lavori in altre opere (uscente come beneficio dal ciclo).

La Tabella 3.22 mostra il quantitativo di materiale, in termini di volume e massa, riciclabili a partire dalla struttura originaria. Contrariamente al caso precedente, in cui tutto il materiale

veniva abbandonato in discarica, ora solo una piccola percentuale non viene riutilizzato: circa il 16%.

Tabella 3.22: Quantitativo e percentuale di materiale riciclato Scenario I

Materials	Recycling [%]	Recycled volume [m ³]	Recycled mass [ton]	Landfill volume [m ³]	Landfill mass [ton]
Reinforcing steel	100	4.07	31.98	0.00	0.00
Glass	100	1.24	2.07	0.00	0.00
Brick	80	1 316.66	1 636.92	329.16	409.23
Ceramic Tile	80	243.04	76.83	60.76	19.21
Wood	100	14.72	8.83	0.00	0.00
Concrete	95	426.67	1 024.02	22.46	53.90
		Total Recycled volume	2 006.40	Total Landfill volume	412.38
		Total Recycled mass	2 780.66	Total Landfill mass	482.33
		% Recycled mass	85.22	% Landfill mass	14.78

Come anticipato, solo una quota parte del materiale riciclato verrà effettivamente impiegato nella nuova struttura. Tuttavia, la percentuale di materiale che può essere riusata non è molto elevata; ciò è dovuto alla carenza di proprietà del materiale riciclato, inoltre i capitolati sono molto restrittivi in merito all'uso di questi materiali (ad esempio il calcestruzzo triturato impiegato come aggregato).

La restante parte di materiale riciclato verrà comunque utilizzata per altri scopi in altre opere (Tabella 3.23) i cui i requisiti richiesti sono meno restrittivi (sottofondi stradali).

Tabella 3.23: Reimpiego del materiale riciclato Scenario I

Materials	Reused in the same structure [%]	Reused volume [m ³]	Reused mass [ton]	Other reuse [%]	Other reuse volume [m ³]	Other reuse mass [ton]
Reinforcing steel	93	3.79	29.75	7	0.28	2.24
Glass	0	0.00	0.00	100	1.24	2.07
Brick	0	0.00	0.00	80	1 316.66	1 636.92
Ceramic Tile	0	0.00	0.00	80	243.04	76.83
Wood	13	1.91	1.15	87	12.81	7.69
Concrete	30	134.74	323.37	65	291.93	700.64
		Total Reused volume	140.44	Total Other reuse volume	1 835.96	
		Total Reused mass	354.27	Total Other reuse mass	2 426.39	

Per semplice differenza tra il materiale riciclato e il materiale richiesto nella nuova costruzione si può valutare quanto materiale di nuova produzione sarà necessario per realizzare l'edificio (Tabella 3.24).

Tabella 3.24: Quantitativo di materiale di nuova produzione Scenario I

Materials	New material [m ³]	New material [ton]
Reinforcing steel	1.51	11.83
Glass	1.66	4.14
Brick	1 645.82	2 046.15
Ceramic Tile	303.80	96.04
Wood	12.81	7.69
Concrete	404.22	970.12
	Total new volume	2 369.81
	Total new mass	3 135.97

Si può notare come, per mezzo del riciclo, il materiale di nuova produzione necessario sia inferiore a quello teoricamente previsto senza riciclaggio. La parte di nuovo materiale mancante non è che non verrà prodotta, semplicemente la si otterrà per mezzo del riciclo delle macerie del vecchio edificio con un minor consumo di materie prime, dispendio di energia ed emissioni inquinanti.

Nel seguente scenario occorre inoltre fare delle considerazioni molto importanti nei confronti della quota parte di materiale riciclato adibita ad altri usi (*Tabella 3.*). Tale materiale, benché non rientri nel ciclo del nuovo edificio, viene comunque considerato. Tramite appositi trattamenti si ha la possibilità di ottenere un nuovo prodotto con un dispendio di energie e quantitativi di materie prime minori rispetto alla sua normale produzione. Il vantaggio che ne deriva si esplica in un minore inquinamento ottenuto per “conseguenza” (*Consequential*) di una nuova “produzione evitata” (*Avoided product*). Una valutazione del ciclo di vita consequenziale è progettata per generare informazioni sulle conseguenze delle decisioni. La metodologia *Consequential* mira dunque a descrivere come i flussi fisici rilevanti per l'ambiente possano cambiare in risposta a possibili cambiamenti apportati nel ciclo di vita (in questo caso il riciclaggio del materiale per altri usi).

Quello che ne deriva in termini di risparmio viene inteso come un vantaggio per l'ambiente e le varie categorie d'impatto. Lo scopo principale della seguente analisi è infatti la valutazione del beneficio che si ottiene mediante il riciclo degli scarti edili, nel caso in cui questi siano reintrodotti nel ciclo della nuova struttura oppure prodotti come nuovo materiale per altre opere. Questo vantaggio verrà mostrato nel Capitolo 4. con un impatto che non si svilupperà sull'asse positivo delle ordinate bensì su quello negativo; ciò viene inteso come un beneficio.

3.7 Scenario II

Lo scenario II valuta ciò che accade demolendo solo alcuni elementi della struttura rivestendola a sua volta con un esoscheletro esterno che la stabilizzi, il tutto senza il riciclo del materiale demolito. Tutte le fasi di lavoro sono mostrate nel diagramma di flusso sottostante (Figura 3.17).

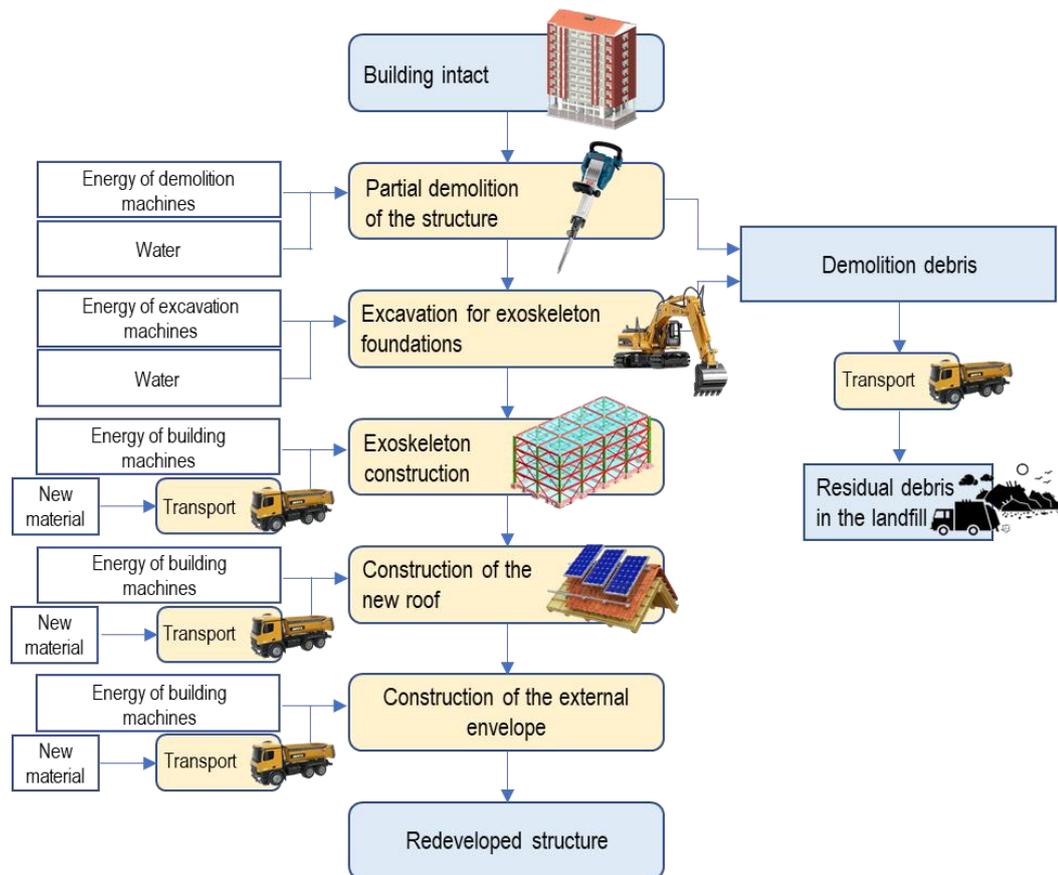


Figura 3.17: Diagramma di flusso Scenario II

Anche il seguente scenario parte dalla condizione di edificio intatto. Segue poi la fase di demolizione parziale di alcuni elementi di muratura, balconi e copertura, tale operazione è eseguita martello pneumatico (Tabella 3.9) e mediante l'aggiunta di acqua per evitare un eccessivo rilascio di polvere. Tutto i detriti verranno poi trasportati, tramite appositi autocarri (Tabella 3.8) presso il luogo di discarica.

Tramite escavatore e pala caricatrice si eseguono le operazioni di scavo per le fondazioni dell'esoscheletro. Per l'esecuzione dello scavo il terreno dovrà essere inumidito tramite l'impiego di acqua e la quota parte di terreno che non verrà riusata per il rinterro sarà trasportata alla discarica.

Le fasi successive riguardano la costruzione dell'esoscheletro e degli elementi ad esso legati per l'incremento delle prestazioni estetiche ed energetiche dell'edificio. Tutte queste operazioni sono eseguite mediante una gru a torre (*Tabella 3.11*) per la costruzione dell'esoscheletro, autocarri per il trasporto del nuovo materiale (*Tabella 3.10*) e betoniera (*Tabella 3.12*).

Nella *Tabella 3.25* vengono mostrati i quantitativi di materiali che sopraggiungeranno alla discarica.

Tabella 3.25: Quantitativo di materiale alla discarica Scenario II

Materials	Recycling [%]	Volume [m ³]	Mass [ton]
Reinforcing steel	0	0.50	3.93
Glass	0	1.24	2.07
Brick	0	10.00	8.00
Ceramic Tile	0	11.00	27.00
Wood	0	5.00	3.00
Concrete	0	5.00	12.00
Total Landfill volume			32.74
Total Landfill mass			55.99
% Recycled mass			0.00

Poiché non si ha alcun riciclo del materiale demolito tutte le macerie verranno trasportate alla discarica.

Per la realizzazione dell'esoscheletro e degli elementi ad esso connessi saranno necessari certi quantitativi di risorse come mostrato nella *Tabella 3.26*.

Tabella 3.26: Quantitativo di materiale necessario per l'esoscheletro Scenario II

Materials	Volume [m ³]	Mass [ton]	Reference
Reinforcing steel	1.00	7.85	Hypothesis
Steel	24.05	189.00	Primary data
Glass	1.66	4.14	Hypothesis
Brick	0.00	0.00	Primary data
Ceramic Tile	1.00	1.93	Hypothesis
Wood	5.00	3.00	Hypothesis
Concrete	90.00	216.00	Hypothesis
Total new volume		148.66	
Total new mass		421.92	

In assenza di riciclo di materiale l'edificio sarà realizzato con materiali di nuova produzione.

3.8 Scenario II Consequential

Lo Scenario II Consequential, in maniera analoga allo Scenario I Consequential (Capitolo 3.6), si basa sulla condizione di riciclaggio del materiale demolito rispettando i minimi imposti dalla direttiva europea 2008/98/CE (minimo 70%). Le modalità di trattamento, nonché di riciclaggio, dei materiali demoliti sono le medesime. Tuttavia, nel seguente scenario, così come nel precedente (Capitolo 3.6), si valuta ciò che accade con la realizzazione di un esoscheletro esterno per riqualificare la struttura. Tutte le fasi di lavoro sono mostrate nel diagramma di flusso sottostante (Figura 3.18).

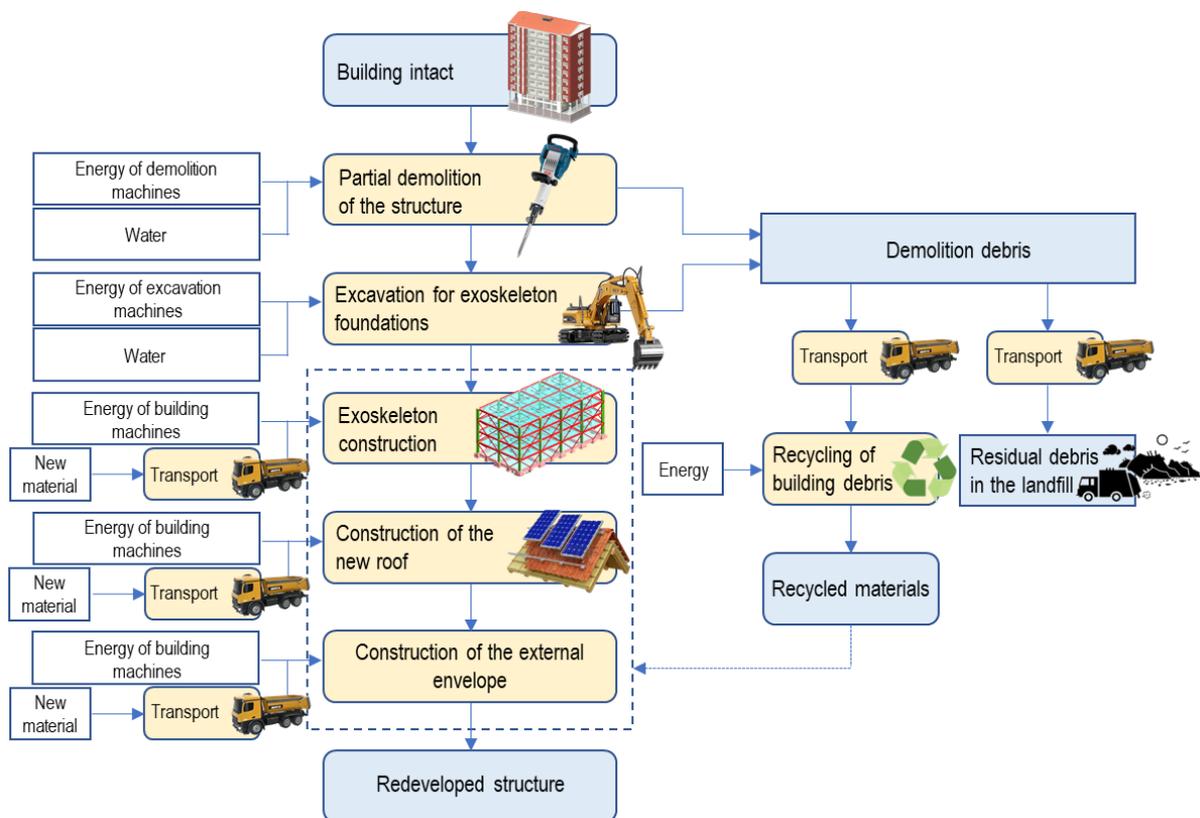


Figura 3.18: Diagramma di flusso Scenario II Consequential

Partendo dall'edificio intatto si realizzano delle operazioni di demolizione parziale permettendo la realizzazione dell'involucro esterno addossato alla struttura originaria. Ogni operazione di costruzione richiede un consumo di materiali (materiali richiesti e macerie prodotte) e un dispendio di energia per i macchinari (da trasporto e da demolizione). Il vantaggio derivante da questo scenario è la ridotta produzione di detriti.

La tabella seguente (Tabella 3.27) mostra il quantitativo di materiale, in termini di volume e massa, che possono essere riciclati a partire dalle macerie della demolizione parziale.

Tabella 3.27: Quantitativo di materiale alla discarica Scenario II

Materials	Recycling [%]	Recycled volume [m ³]	Recycled mass [ton]	Landfill volume [m ³]	Landfill mass [ton]
Reinforcing steel	100	0.50	3.93	0.00	0.00
Glass	100	1.24	2.07	0.00	0.00
Brick	80	8.00	6.40	2.00	1.60
Ceramic Tile	80	8.80	21.60	2.20	5.40
Wood	100	5.00	3.00	0.00	0.00
Concrete	95	4.75	11.40	0.25	0.60
		Total Recycled volume	28.29	Total Landfill volume	4.45
		Total Recycled mass	48.39	Total Landfill mass	7.60
		% Recycled mass	86.43	% Landfill mass	13.57

Nonostante il materiale riciclato non sia eccessivo, come per il Capitolo 3.6, solo una quota parte verrà reimpiegata nel restauro, la parte restante sarà utilizzato per altri scopi in altre opere (Tabella 3.28).

Tabella 3.28: Reimpiego del materiale riciclato Scenario II

Materials	Reused in the same structure [%]	Reused volume [m ³]	Reused mass [ton]	Other reuse [%]	Other reuse volume [m ³]	Other reuse mass [ton]
Reinforcing steel	93	0.47	3.65	7	0.04	0.27
Glass	0	0.00	0.00	100	1.24	2.07
Brick	0	0.00	0.00	80	8.00	6.40
Ceramic Tile	0	0.00	0.00	80	8.80	21.60
Wood	13	0.65	0.39	87	4.35	2.61
Concrete	30	1.50	3.60	65	3.25	7.80
		Total Reused volume	2.62	Total Other reuse volume		25.68
		Total Reused mass	7.64	Total Other reuse mass		40.75

Per semplice differenza tra il materiale riciclato e il materiale richiesto per la realizzazione dell'involucro si può valutare quanto materiale di nuova produzione sarà necessario per realizzare l'esoscheletro (Tabella 3.29).

Tabella 3.29: Reimpiego del materiale riciclato Scenario II

Materials	New material [m³]	New material [ton]
Reinforcing steel	0.54	4.20
Steel	24.05	189.00
Glass	1.66	4.14
Brick	0.00	0.00
Ceramic Tile	1.00	1.93
Wood	4.35	2.61
Concrete	88.50	212.40
	Total new volume	146.05
	Total new mass	414.28

Si può notare come il vantaggio indotto dal riciclo del materiale non sia considerevole. Ciò è dovuto alla scarsità di macerie prodotte. La realizzazione dell'esoscheletro esterno si basa infatti sulla condizione di essere un intervento poco invasivo sia da un punto di vista strutturale che da un punto di vista ambientale.

Contrariamente a quanto avviene tra lo Scenario I e lo Scenario I Consequential dove le macerie sono più consistenti, lo Scenario II Consequential risulta povero di detriti e il beneficio indotto dal riciclo non produrrà delle differenze significative con lo Scenario II senza riciclo. La differenza più rimarchevole, con o senza riciclo, la si potrà notare tra lo Scenario I e lo Scenario II (demolizione/ricostruzione e riqualificazione).

Capitolo 4

Life Cycle Impact Assessment (LCIA)

L'analisi di inventario (*Life Cycle Inventory*, LCI) sviluppata nel capitolo precedente permette di classificare tutti gli input (materiali ed energie) che scandiscono le varie fasi dell'analisi. I seguenti dati, implementati su SimaPro 8.4, produrranno dei file con tutte le emissioni, ed i relativi grafici, per ognuno degli scenari analizzati. Sulla base di questi risultati è possibile effettuare l'analisi degli impatti. Lo scopo è quello di evidenziare l'entità delle modifiche ambientali che si generano in seguito alle emissioni nonché al consumo delle risorse associate alla produzione dei vari materiali. Nel seguente capitolo si andranno quindi ad interpretare tali risultati espressi in differenti categorie d'impatto. Oltre all'analisi dell'impatto di ogni singolo scenario si andrà a valutarne anche il relativo confronto. Lo scopo principale è valutare come si comportano i vari scenari e poter identificare quale fra questi sia il meno impattante o perlomeno il più efficiente. Per la valutazione degli impatti è stato impiegato il metodo ILCD 2011 Midpoint.

4.1 Metodo ILCD Midpoint

Il *Life Cycle Assessment* (LCA) è un approccio scientifico alla base di un numero crescente di politiche ambientali nel contesto del consumo e della produzione sostenibile (*Sustainable Consumption and Production*, SCP). L'*International Reference Life Cycle Data System* (ILCD) fornisce una solida base comune per dati, metodi e valutazioni coerenti, aventi qualità garantita. Quando si effettua una valutazione del ciclo di vita, le emissioni rilasciate e le risorse consumate, collegate ad uno specifico prodotto, sono raccolte e documentate in un inventario del ciclo di vita (LCI). Questo inventario costituisce la base per l'esecuzione dell'analisi.

I metodi disponibili per la valutazione degli impatti sono molteplici e vanno scelti in funzione dell'analisi che si vuole effettuare e delle categorie di impatto che si vogliono esaminare. Ogni metodo contiene dalle 10 alle 20 categorie di impatto.

Il metodo ILCD 2011 Midpoint è un metodo di caratterizzazione che fornisce indicatori per il confronto degli interventi ambientali a livello della catena di causa-effetto tra emissioni/consumo di risorse e livello di endpoint.

I modelli per la caratterizzazione raccomandati e i fattori di caratterizzazione associati alla ILCD sono classificati in base alla loro qualità in tre differenti livelli: "Livello I" (raccomandato e soddisfacente), "Livello II" (raccomandato ma necessita di alcuni miglioramenti) o "Livello III" (raccomandato, ma da applicare con cautela). È importante notare che in alcuni casi i singoli fattori di caratterizzazione sono classificati più bassi (*down-rated*) rispetto al livello

generale del metodo di per sé (un metodo può essere "Livello II" ma diversi flussi sono solo "Livello III" o "Interim" per mancanza ad esempio di alcuni dati). Una classificazione mista (ad es. Livello I/II) è correlata all'applicazione del metodo classificato a diversi tipi di sostanze, il cui livello di raccomandazione è differenziato. Il primo livello si riferisce al livello di raccomandazione del metodo e il secondo si riferisce invece ad un declassamento per determinati fattori di caratterizzazione calcolati con quel metodo. Con "Interim", invece, si indica un metodo che è stato considerato il più promettente tra gli altri per la stessa categoria di impatto, ma non ancora pronto da raccomandare. Ciò non indica che la categoria di impatto non sia pertinente, ma che sono necessari ulteriori sforzi prima di poter fornire qualsiasi raccomandazione (JRC Technical Note, 2012) [29].

Le categorie d'impatto (*midpoint*) come detto sono molteplici e permettono di valutare l'impatto associato ad una particolare produzione o fase lavorativa. Le categorie prese in esame in una valutazione d'impatto del ciclo di vita (*Life Cycle Impact Assessment, LCIA*) riguardano i seguenti fattori (*Figura 4.1*): i cambiamenti climatici, l'esaurimento dell'ozono, tossicità umana (cancerogeni e non), respiratori inorganici, radiazioni ionizzanti, formazione di ozono fotochimico, l'acidificazione, l'eutrofizzazione, ecotossicità, uso del suolo e esaurimento delle risorse (materiali, energia, acqua).

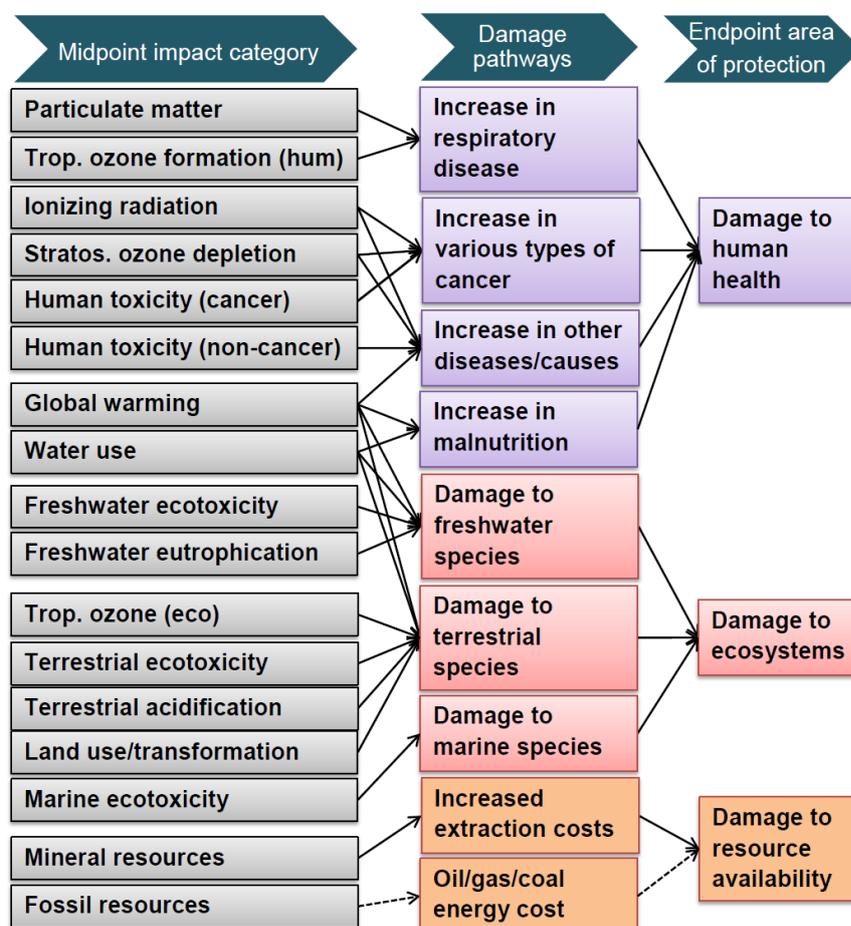


Figura 4.1: Categorie d'impatto a livello di midpoint ed endpoint [30]

Le conseguenze che ne derivano possono essere raggruppate principalmente in tre aree di protezione principali (*endpoint*): salute umana, ambiente naturale e questioni relative alle modalità d'uso delle risorse naturali. Queste tre macro-categorie rappresentano la categoria di danno.

Nella tabella seguente (*Tabella 4.1*) vengono riepilogati i modelli, gli indicatori e i livelli raccomandati per ogni impatto nella condizione di "Midpoint".

Tabella 4.1: Modelli, indicatori e livelli di raccomandazione per le categorie d'impatto [29]

Impact category	Model	Indicator	Recommended level
Climate change	IPCC, 2000	GWP100	I
Ozone depletion	WMO, 1999	ODP	I
Human toxicity: cancer effects	Rosenbaum et al 2008	Comparative Toxic Unit for Human Health (CTUh)	II/III
Human toxicity: non cancer effects	Rosenbaum et al 2008	Comparative Toxic Unit for Human Health (CTUh)	II/III
Particulate matters	RiskPoll and Greco et al 2007	PM2.5eq	II/III
Ionising radiation: human health	Frischknecht et al 2000	Ionizing Radiation Potentials	II
Ionising radiation: ecosystem	Garnier- Laplace et al 2009	Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTUe)	Interim
Photochemical ozone formation	Van Zelm et al 2008	POCP	II
Acidification	Seppala et al 2006	Accumulated Exceedance (AE)	II
Eutrophication: terrestrial	Seppala et al 2006	Accumulated Exceedance (AE)	II
Eutrophication: aquatic freshwater	ReCiPe2008	P equivalents and N equivalents	II
Eutrophication: marine	ReCiPe2008	P equivalents and N equivalents	II
Ecotoxicity: freshwater	Rosenbaum et al 2008	Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTUe)	II/III
Land use	Mila I Canals et al 2007a	SOM	III
Resource depletion: water	Frischknecht et al 2008	Water consumption equivalent	III
Resource depletion: mineral and fossil fuels	Guinée et al 2002	Scarcity	II

Ognuno di questi impatti sarà poi caratterizzato da una propria unità di misura. Tali unità possono essere comuni a molti impatti. Tuttavia, affinché si possa effettuare un confronto globale dei risultati, questi dovranno essere normalizzati; in tal maniera sarà possibile valutare l'incidenza di un particolare materiale o processo tra più categorie (ad esempio, un materiale può essere poco impattante per il *climate change* ma al tempo stesso molto impattante la tossicità umana).

Climate change

Il cambiamento climatico risulta essere uno degli impatti più importanti da tener in considerazione in un'analisi LCA. Questo provoca una serie di meccanismi ambientali che incidono sia sulla salute umana che sulla salute dell'ecosistema. I modelli di cambiamento climatico sono generalmente descritti per valutarne il futuro impatto ambientale per diversi scenari.

L'effetto serra, insieme di alcuni gas detti "gas serra" è un fenomeno naturale che permette il riscaldamento dell'atmosfera terrestre in una maniera tale da poter favorire la vita. In assenza di tale effetto le temperature sarebbero troppo basse. Negli ultimi decenni le attività dell'uomo hanno portato ad un sempre più rapido aumento della concentrazione dei gas serra nell'atmosfera; ciò ha comportato ad un'alterazione dell'equilibrio della terra. La conseguenza è un anomalo aumento della temperatura media terrestre. Degli scienziati francesi hanno previsto che entro il 2100, nel peggiore degli scenari, ci potrebbe essere un aumento della temperatura media globale tra 6.5 e 7 °C. L'aumento della temperatura media atmosferica media è la causa principale dei cambiamenti climatici [31].

Per quanto concerne la categoria di impatto del cambiamento climatico, la modellizzazione del danno è suddivisa in più fasi tra loro sequenziali. Le emissioni di gas serra (kg) porteranno ad un suo aumento nella concentrazione atmosferica; a sua volta aumenterà la capacità di forzatura radiativa, portando di conseguenza ad un aumento della temperatura media globale (°C). Come detto, è proprio tale aumento di temperatura che alla fine provoca danni alla salute umana e agli ecosistemi (ReCiPe, 2016) [30].

Ozone depletion

L'ozono stratosferico, che costituisce circa il 90% dell'ozono totale nell'atmosfera, è essenziale per la vita poiché ostacola la radiazione solare ultravioletta UV: suddivisa in due bande spettrali UV-A e UV-B, potenzialmente più dannosa perché a più alta energia. Questa, se non assorbita, può aumentare il rischio per la salute umana (cancro alla pelle, cataratta, invecchiamento e soppressione del sistema immunitario) e per gli ecosistemi terrestri e acquatici (Fahey, 2002) [32].

L'ozono è continuamente formato e distrutto dall'azione della luce solare e dalle reazioni chimiche nella stratosfera. L'esaurimento dell'ozono si verifica se il tasso di distruzione aumenta; ciò avviene in seguito alle emissioni di sostanze antropogeniche che persistono nell'atmosfera. Tali sostanze (*Ozone Depleting Substances*, ODS) sono principalmente composti di cloro e bromo, come CFC (clorofluorocarburi), e possiedono lunghi tempi di permanenza nell'atmosfera. Il potenziale di riduzione dell'ozono (ODP) è stato definito come una misura

relativa della capacità di riduzione dell'ozono di un ODS e utilizza CFC-11 (triclorofluorometano) come riferimento. In LCIA ODP viene utilizzato come fattore di equivalenza.

La categoria d'impatto è suddivisa in fasi sequenziali: in seguito all'emissione di un ODS, aumentano le concentrazioni troposferiche di tutti gli ODS e, dopo un certo lasso di tempo, aumenta anche la concentrazione stratosferica di ODS. Questo aumento del potenziale di riduzione dell'ozono porta a una diminuzione della concentrazione atmosferica di ozono che, a sua volta fa sì che una parte maggiore della radiazione UV-B colpisca la terra. Questo aumento delle radiazioni influisce negativamente sulla salute umana (ReCiPe, 2008)[33].

Toxicity: human cancer and non-cancer effects, ecotoxicity

Il fattore di caratterizzazione della tossicità umana e dell'ecotossicità spiega la persistenza dell'ambientale (*fate*), l'accumulo nella catena alimentare umana (*exposure*) e la tossicità (*effect*) di una sostanza chimica. In seguito ad un'emissione chimica, per mezzo di un percorso causa-effetto si avrà (ReCiPe, 2016) [30]:

- per l'uomo un incremento delle malattie e quindi un danno per la salute umana.
- per l'ambiente una potenziale scomparsa di una frazione di specie e quindi un danno all'ecosistema;

Per quanto riguarda la cancerogenicità di una sostanza, va precisato che non tutte le sostanze con un TD₅₀ cancerogeno sono necessariamente cancerogene per l'uomo. L'Agenzia internazionale per la ricerca sul cancro (IARC), parte dell'Organizzazione mondiale della sanità (WHO), ha valutato il rischio cancerogeno di 844 differenti sostanze per l'uomo assegnando per ognuna di esse una classe di cancerogenicità (IARC 2004) [34]. Queste classi riflettono la forza delle prove di cancerogenicità derivate da studi sull'uomo, su animali e da altri dati ad essi associati. Risulta possibile suddividere queste informazioni in due scenari. Lo scenario egualitario e gerarchico che include le sostanze con insufficiente evidenza di cancerogenicità (categoria IARC 1, 2A, 2B, 3 o nessuna classificazione) e lo scenario individualistico che include solo le sostanze con evidenti segni di cancerogenicità (categoria IARC 1, 2A e 2B).

Per quanto riguarda l'ecotossicità marina l'impatto, in tale ambiente, è dato essenzialmente dai metalli negli oceani. I metalli sono essenzialmente cobalto, rame, manganese, molibdeno e zinco.

Particulate matters

L'inquinamento atmosferico che provoca aerosol primari e secondari nell'atmosfera può avere un impatto negativo importante sulla salute umana, che va dai sintomi respiratori ai ricoveri ospedalieri fino alla morte. La materia particolata fine con un diametro inferiore a $10\mu\text{m}$ (PM_{10}) rappresenta una miscela complessa di sostanze organiche e inorganiche e può avere origini sia antropogeniche che naturali. Il PM_{10} causa problemi di salute quando, una volta inalato, raggiunge la parte superiore delle vie aeree e dei polmoni. Gli aerosol PM_{10} secondari si formano nell'aria dalle emissioni di anidride solforosa (SO_2), ammoniaca (NH_3) e ossidi di azoto (NO_x) (WHO, 2003) [35].

Gli studi del WHO mostrano che gli effetti della mortalità dell'esposizione a PM sono probabilmente attribuibili a $\text{PM}_{2,5}$ piuttosto che a particelle più grossolane. Particelle con un diametro tra $2,5\mu\text{m}$ e $10\mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5/10}$) possono avere impatti più visibili sulla difficoltà respiratoria (WHO, 2006) [36]. L'inalazione di diverse dimensioni di particolato può quindi causare diversi problemi di salute.

Per esprimere gli anni di vita intaccati da problemi alla salute respiratoria causati dall'esposizione a $\text{PM}_{2,5}$, vengono utilizzati come misura gli "anni di vita corretti per la disabilità" (*Disability Adjusted Life Years, DALY*).

Ionizing radiation: human health and ecosystem

In tale paragrafo si vanno a valutare i danni alla salute umana in seguito alle emissioni di materiale radioattivo nell'ambiente.

Le emissioni antropogeniche di radionuclidi sono generate nel ciclo del combustibile nucleare (estrazione, lavorazione e smaltimento dei rifiuti), nonché durante altre attività umane, come la combustione del carbone e l'estrazione di roccia fosfatica. Innanzitutto, viene modellata la dispersione del radionuclide nell'ambiente. Questo passaggio è seguito da un modello di esposizione in cui viene determinata la quantità di radiazione (dose collettiva effettiva) ricevuta dall'intera popolazione. L'esposizione alle radiazioni ionizzanti causate da questi radionuclidi può portare al danneggiamento del DNA (Frischknecht et al., 2000) [37].

Al momento però non esistono metodologie precise di valutazione dell'impatto per quantificare il danno causato agli ecosistemi dalle radiazioni ionizzanti. Per tale categoria di impatto si è infatti associata la terminologia "interim". Si indica così un metodo che è stato considerato promettente per quella categoria di impatto, ma non ancora pronto da raccomandare. Ciò non significa che la categoria di impatto non sia pertinente, ma semplicemente che sono necessari ulteriori sforzi prima di poter fornire qualsiasi raccomandazione.

Photochemical ozone formation

L'inquinamento fotochimico è un particolare tipo di inquinamento dell'aria che si produce in giornate con condizione meteorologiche stabili e molto soleggiate (periodi estivi) in presenza di abbondanti quantità di ossidi di azoto (NO_x) e composti organici volatili non metanici (NMVOCs) [30]. Per effetto della luce ultravioletta, presente nelle radiazioni solari, tali sostanze vengono coinvolte in reazioni fotochimiche che portano alla formazione di ozono. L'ozono è prima di tutto pericoloso per la salute dell'uomo poiché, penetrando nell'apparato respiratorio, può infiammare le vie aeree e danneggiare i polmoni. Può avere un impatto negativo sulla vegetazione e sulla riproduzione delle specie vegetali. Inoltre, secondo un punto di vista più economico può intaccare i materiali per mezzo di fenomeni di ossidazione. La modellazione dall'emissione al danno è suddivisa in fasi consecutive. Le emissioni di NO_x o NMVOC vengono trasformati in ozono. Successivamente l'ozono può essere inalato dalla popolazione umana o assorbito dalle piante; questo porta ad aumento del numero dei casi di mortalità tra gli esseri umani ed effetti dannosi sulle specie vegetali. Il danno finale si registra sulla salute umana e sugli ecosistemi.

Per esprimere gli anni di vita colpiti da danni alla salute respiratoria in seguito all'esposizione all'ozono, vengono utilizzati come misura gli "anni di vita corretti per la disabilità" (DALY). Per esprimere invece il danno alle specie terrestri colpite dall'esposizione all'ozono, viene utilizzata come misura la "specie · anno" (species · y).

Acidification

La deposizione atmosferica di sostanze inorganiche, come solfati, nitrati e fosfati, provoca un cambiamento di acidità nel terreno. Per quasi tutte le specie di piante esiste un livello ottimale di acidità. Una deviazione da questo livello ottimale è dannosa per quel tipo specifico di specie. Questa condizione viene definita acidificazione. Le principali emissioni acidificanti sono NO_x , NH_3 o SO_2 presenti in atmosfera sia per cause naturali che per attività umane (Azevedo et al., 2015) [38].

L'analisi può essere eseguita con un modello di deposizione atmosferica combinato con un modello di acidificazione geochimica del suolo (Roy et al., 2012, Van Zelm et al., 2007) [39] [40].

Con l'espressione piogge acide s'intende generalmente il processo di ricaduta dall'atmosfera di particelle, gas e precipitazioni acide. Nel caso in cui questi gas entrino in contatto con l'acqua atmosferica, si origineranno acidi prima della deposizione. In presenza di acqua infatti gli ossidi di zolfo originano l'acido solforico, mentre gli ossidi di azoto si trasformano in acido nitrico con conseguente acidificazione delle precipitazioni.

Eutrophication: terrestrial and aquatic

L'eutrofizzazione dell'acqua dolce si verifica a causa dello scarico di nutrienti, fosforo e azoto, nel suolo o nei corsi d'acqua dolce. Tale scarico di nutrienti può essere di origine naturale o antropica (fertilizzanti, scarichi civili o industriali). Questo porta ad un eccessivo accrescimento delle piante acquatiche.

Il principale problema di tale accrescimento si registra nel momento in cui tali piante muoiono con conseguente riduzione importante di ossigeno; ciò è dovuto alla loro decomposizione che produce grandi quantità di ammoniaca, metano e acido solfidrico. Per effetto di tali emissioni si avrà, oltre ad un aumento della torbidità e cattivo odore dell'acqua, anche un aumento della mortalità delle specie ittiche.

Si tratta di una tipologia d'inquinamento destinata a peggiorare con il riscaldamento globale.

Land use

La seguente categoria di impatto valuta l'uso del suolo e riflette sul danno agli ecosistemi dovuto agli effetti all'occupazione e alla trasformazione della terra.

Il modello si struttura su due diverse modalità di uso del suolo (ReCiPe, 2008) [33]:

- occupazione di una determinata porzione di terra per un certo periodo di tempo;
- trasformazione del materiale in un determinata area di terra.

Entrambi i meccanismi possono essere combinati. Può capitare che ad un'occupazione segua una trasformazione, oppure, come accade più frequentemente, che l'occupazione si verifichi in un'area che è già stata trasformata. In tali casi non viene assegnato alcun impatto sul sistema produttivo che occupa un'area. La biodiversità può anche essere influenzata indirettamente dall'uso del suolo, poiché un cambiamento della copertura del terreno e, l'intensificazione dell'uso stesso, possono portare ad un aumento delle emissioni di gas serra. Tali emissioni deriverebbero dalla combustione di biomassa o dall'applicazione di fertilizzanti e possono quindi contribuire al cambiamento climatico.

Resource depletion: water

L'acqua è una risorsa fondamentale presente in grandi quantità in alcune regioni del mondo ma al tempo stesso scarsa in molte altre parti. Contrariamente ad altre risorse, per l'acqua non esiste un mercato che ne garantisca una distribuzione globale. Il mercato infatti non funziona su grandi distanze, essendo i costi di trasporto troppo elevati. L'estrazione dell'acqua in un'area asciutta può essere molto dispendiosa con danni agli ecosistemi e alla

salute umana non trascurabili. L'ipotesi che si effettua è che l'acqua che è stata consumata non è più disponibile nello spartiacque di origine né per l'uomo né per l'ecosistema. Si può tuttavia disporre di un indicatore che esprima semplicemente l'importo totale di acqua utilizzata. Le fasi della modellazione sono strutturate in base alla riduzione della disponibilità di acqua.

Per l'uomo, una riduzione di disponibilità di acqua porta ad una competizione su come ridistribuire l'acqua (riduzione irrigazione). Una scarsa irrigazione comporterà una riduzione della produzione agricola e di conseguenza un aumento della malnutrizione nella popolazione locale (Paesi poveri). Per i paesi industrializzati invece, con HDI > 0,88 (*Human Development Indexes*) le modalità per il reperimento del cibo sono maggiori; si evitano così condizioni di malnutrizione e il verificarsi di danni alla salute (ReCiPe, 2016) [30].

Gli impatti sugli ecosistemi terrestri, invece, sono modellati attraverso una potenziale riduzione della vegetazione e della diversità delle piante. Il ragionamento che si effettua è che una riduzione dell'acqua blu (laghi, fiumi, falde acquifere) potrebbe potenzialmente ridurre anche l'acqua verde disponibile (umidità del suolo) e quindi portare a una riduzione delle specie vegetali.

Resource depletion: mineral and fossil fuels

Lo sviluppo industriale e la crescita economica conducono inevitabilmente ad una richiesta sempre maggiore di risorse con conseguente impoverimento delle riserve rimanenti (risorse minerarie ed energetiche). Il concetto di risorsa è quindi strettamente legato a quello di riserva.

I minerali sono sostanze presenti in natura formate attraverso processi geologici. Un minerale è estratto da un deposito e la maggior parte dei depositi contiene differenti tipologie di minerali. I minerali o i metalli sono la produzione economica di un'operazione mineraria. Alcuni metalli possono essere estratti come sottoprodotto: molibdeno, indio e gallio.

Il combustibile fossile si riferisce ad un gruppo di risorse che contengono idrocarburi. Il gruppo varia da materiali volatili (come il metano), benzina liquida, a materiali non volatili (come il carbone). Si ipotizza che i combustibili fossili con i costi più bassi vengano estratti per primi. Ad esempio, quando tutto il petrolio convenzionale sarà esaurito, verranno applicate tecniche alternative, oppure, il petrolio verrà estratto in località geografiche alternative con costi più elevati, come le regioni artiche (Vieira et al. 2014) [41].

Si tratta di attività fortemente impattanti che godono di cattiva fama soprattutto per i danni che provocano all'ambiente. I danni possono essere temporanei come rumori, polveri e peggioramento della qualità dell'aria e dell'acqua; oppure permanenti relativi al consumo di risorse non rinnovabili e alle modifiche morfologiche sui versanti paesaggistici e idrogeologici (sbancamento montagne per la realizzazione di cave).

4.2 Impatti ambientali del ciclo vita della demolizione e ricostruzione - Scenario I/Scenario I Consequential

I risultati ottenuti dall'analisi vengono riportati nella *Tabella 4.2* per lo Scenario I e nelle *Table 4.3 e 4.4* per lo Scenario I Consequential. Sono riportati in queste tabelle gli "impact score" associati ad ogni materiale o processo lavorativo. Tutti i seguenti dati sono poi normalizzati in riferimento ad un'unica base (*Figura 4.2 e 4.3*); risulta possibile a partire da ciò confrontare i risultati per le varie categorie d'impatto e valutare come una singola operazione o materiale vari da una categoria all'altra.

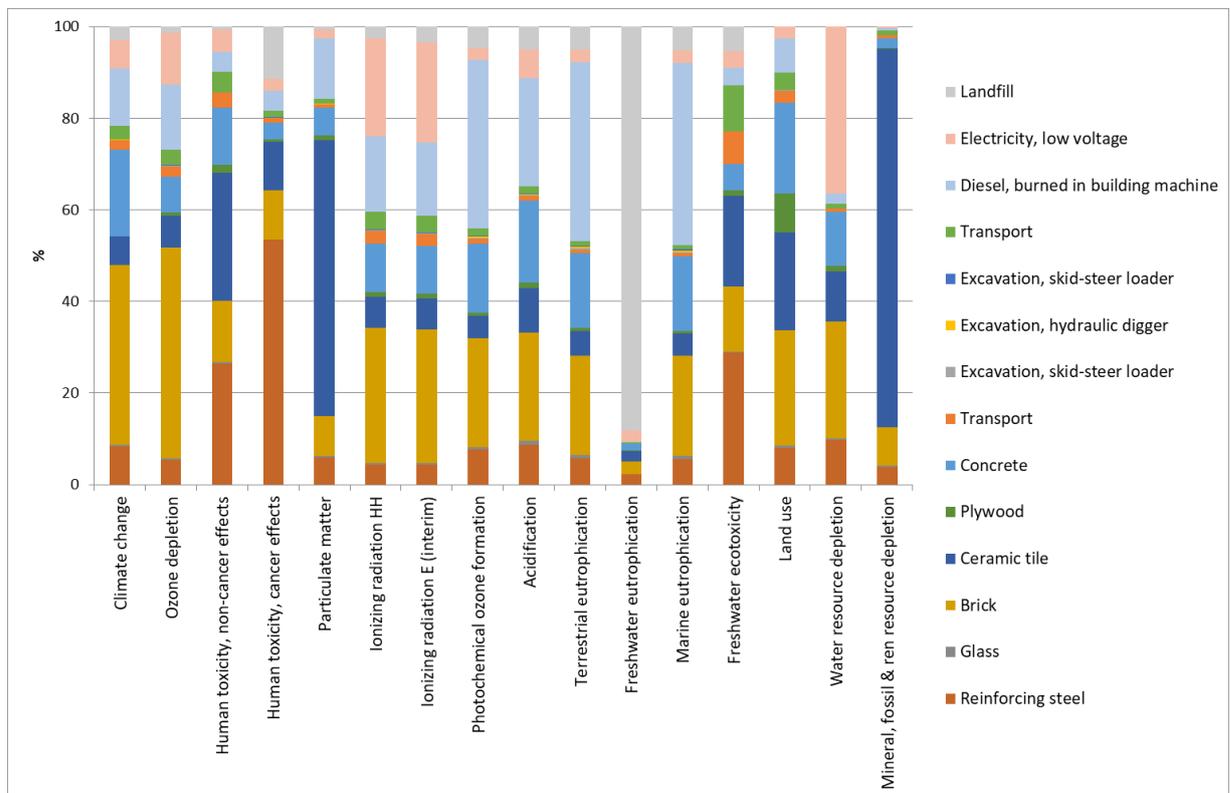


Figura 4.2: Impatti Scenario I

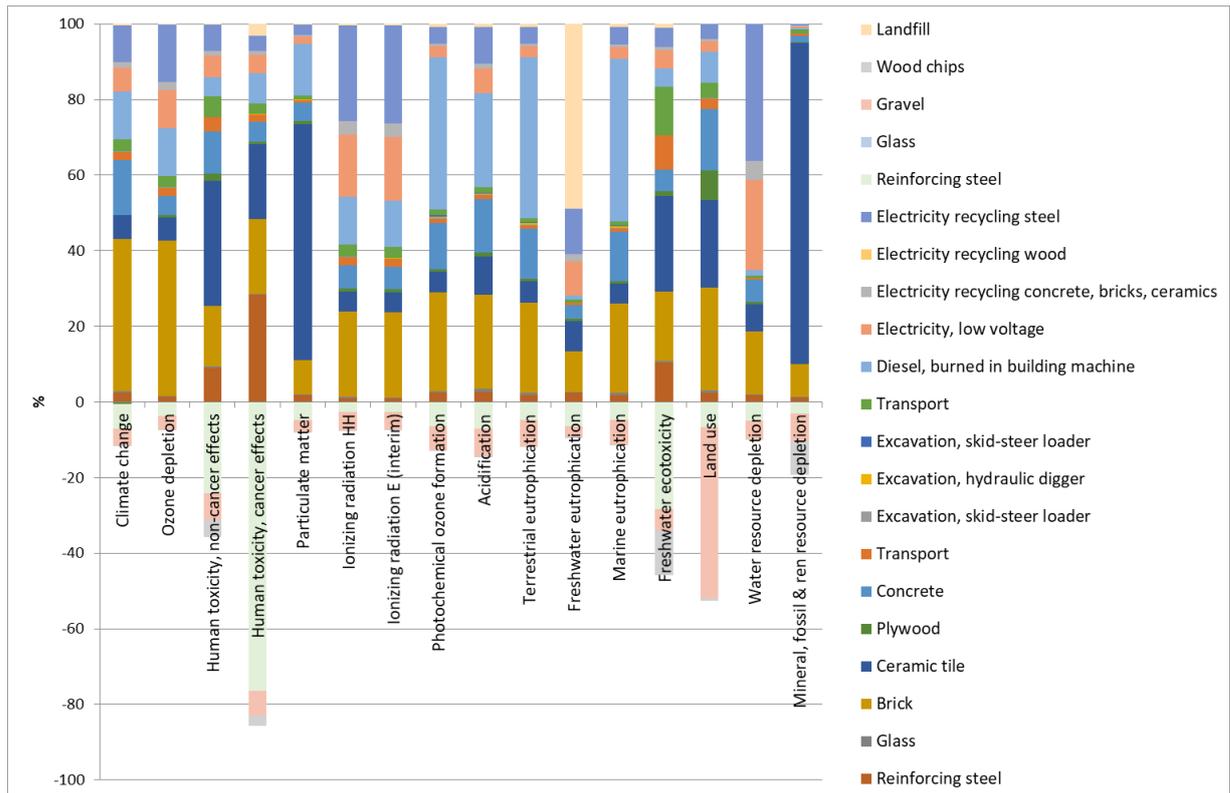


Figura 4.3: Impatti Scenario I Consequential

Dai dati riportati nell'istogramma precedente si osserva chiaramente come ad incidere maggiormente sulle varie categorie d'impatto siano i materiali necessari alla realizzazione della struttura (acciaio, cemento, materiali ceramici) fatta eccezione dell'eutrofizzazione dell'acqua dove a predominare sono i rifiuti depositati in discarica. I contributi meno impattanti sono invece quelli legati ai mezzi d'opera e ai relativi consumi di combustibili fossili.

Delle varie categorie introdotte si è analizzato nello specifico l'effetto indotto sugli impatti ritenuti più importanti:

- Climate change;
- Ozone depletion;
- Human toxicity (cancer/non cancer effects);
- Particulate matter;
- Freshwater Eutrophication;
- Land use;
- Mineral, fossil and energy resource depletion.

Vengono di seguito mostrati i risultati numerici ottenuti dall'analisi per ogni categoria (Tabelle 4.2, 4.3 e 4.4).

Tabella 4.2: Impatti materiali ed operazioni per ogni categoria – Scenario I

Impact category	Reinforcing steel	Glass	Brick	Ceramic tile	Plywood	Concrete	Transport	Excavation, skid-steer loader	Excavation, hydraulic digger	Excavation, skid-steer loader	Transport	Diesel	Electricity, low voltage	Landfill
Climate change [kg CO2 eq]	1,06E+05	5,51E+03	4,97E+05	7,89E+04	-6,11E+03	2,39E+05	2,57E+04	1,24E+03	1,29E+03	9,55E+02	3,66E+04	1,58E+05	7,86E+04	3,82E+04
Ozone depletion [kg CFC-11 eq]	3,98E-03	2,36E-04	3,34E-02	4,99E-03	5,86E-04	5,61E-03	1,67E-03	8,10E-05	8,30E-05	6,23E-05	2,38E-03	1,03E-02	8,17E-03	1,05E-03
Human toxicity, non-cancer effects [CTUh]	2,44E-02	3,16E-04	1,25E-02	2,57E-02	1,74E-03	1,16E-02	2,93E-03	3,36E-05	4,48E-05	2,58E-05	4,18E-03	3,96E-03	4,54E-03	5,94E-04
Human toxicity, cancer effects [CTUh]	1,30E-02	3,03E-05	2,59E-03	2,59E-03	1,14E-04	8,97E-04	2,54E-04	9,54E-06	1,51E-05	7,34E-06	3,62E-04	1,03E-03	6,47E-04	2,78E-03
Particulate matter [kg PM2.5 eq]	8,91E+01	4,29E+00	1,28E+02	8,97E+02	1,54E+01	8,95E+01	9,67E+00	1,53E+00	1,59E+00	1,17E+00	1,38E+01	1,98E+02	2,73E+01	1,05E+01
Ionizing radiation HH [kBq U235 eq]	2,14E+03	1,92E+02	1,43E+04	3,30E+03	5,52E+02	5,18E+03	1,32E+03	6,33E+01	6,46E+01	4,87E+01	1,88E+03	8,05E+03	1,04E+04	1,25E+03
Ionizing radiation E (interim) [CTUe]	1,55E-02	1,38E-03	1,04E-01	2,40E-02	4,03E-03	3,71E-02	9,36E-03	4,49E-04	4,59E-04	3,46E-04	1,33E-02	5,71E-02	7,77E-02	1,26E-02
Photochemical ozone formation [kg NMVOC eq]	4,43E+02	3,08E+01	1,40E+03	2,84E+02	4,05E+01	8,77E+02	6,02E+01	1,68E+01	1,70E+01	1,29E+01	8,59E+01	2,15E+03	1,59E+02	2,69E+02
Acidification [molc H+ eq]	5,72E+02	6,14E+01	1,56E+03	6,33E+02	8,43E+01	1,19E+03	6,82E+01	1,21E+01	1,25E+01	9,34E+00	9,72E+01	1,56E+03	4,12E+02	3,34E+02
Terrestrial eutrophication [molc N eq]	1,15E+03	1,16E+02	4,33E+03	1,04E+03	1,42E+02	3,25E+03	1,42E+02	6,04E+01	6,10E+01	4,65E+01	2,02E+02	7,74E+03	5,45E+02	9,94E+02
Freshwater eutrophication [kg P eq]	7,24E+00	2,01E-01	9,35E+00	7,03E+00	6,62E-01	4,21E+00	5,04E-01	7,76E-03	1,10E-02	5,97E-03	7,19E-01	8,50E-01	7,85E+00	2,87E+02
Marine eutrophication [kg N eq]	1,00E+02	9,98E+00	3,90E+02	8,66E+01	1,12E+01	2,87E+02	1,26E+01	5,51E+00	5,56E+00	4,24E+00	1,80E+01	7,06E+02	5,05E+01	9,09E+01
Freshwater ecotoxicity [CTUe]	1,64E+05	1,79E+03	8,05E+04	1,13E+05	6,24E+03	3,31E+04	4,00E+04	1,88E+02	2,58E+02	1,44E+02	5,70E+04	2,16E+04	2,07E+04	3,07E+04
Land use [kg C deficit]	9,92E+04	6,99E+03	3,13E+05	2,65E+05	1,06E+05	2,47E+05	3,26E+04	7,33E+02	7,77E+02	5,64E+02	4,65E+04	9,35E+04	3,22E+04	0,00E+00
Water resource depletion [m3 water eq]	7,49E+04	2,71E+03	1,97E+05	8,38E+04	9,61E+03	9,08E+04	5,66E+03	1,39E+02	1,97E+02	1,07E+02	8,07E+03	1,68E+04	2,82E+05	7,90E+00
Mineral, fossil & ren resource depletion [kg Sb eq]	6,27E+00	3,22E-01	1,34E+01	1,33E+02	3,66E-01	3,37E+00	1,10E+00	7,08E-03	9,64E-03	5,45E-03	1,57E+00	8,14E-01	6,31E-01	2,59E-02

Tabella 4.3: Impatti dei materiali ed operazioni per ogni categoria – Scenario I Consequential a

Impact category	Reinforcing steel	Glass	Brick	Ceramic tile	Plywood	Concrete	Transport	Excavation, skid-steer loader	Excavation, hydraulic digger	Excavation, skid-steer loader	Transport	Diesel	Electricity, low voltage	Landfill
Climate change [kg CO2 eq]	3,01E+04	5,51E+03	4,97E+05	7,89E+04	-5,31E+03	1,80E+05	2,57E+04	1,24E+03	1,29E+03	9,55E+02	3,66E+04	1,58E+05	7,86E+04	5,64E+03
Ozone depletion [kg CFC-11 eq]	1,13E-03	2,36E-04	3,34E-02	4,99E-03	5,10E-04	4,21E-03	1,67E-03	8,10E-05	8,30E-05	6,23E-05	2,38E-03	1,03E-02	8,17E-03	1,56E-04
Human toxicity, non-cancer effects [CTUh]	6,95E-03	3,16E-04	1,25E-02	2,57E-02	1,51E-03	8,68E-03	2,93E-03	3,36E-05	4,48E-05	2,58E-05	4,18E-03	3,96E-03	4,54E-03	8,79E-05
Human toxicity, cancer effects [CTUh]	3,69E-03	3,03E-05	2,59E-03	2,59E-03	9,92E-05	6,72E-04	2,54E-04	9,54E-06	1,51E-05	7,34E-06	3,62E-04	1,03E-03	6,47E-04	4,11E-04
Particulate matter [kg PM2.5 eq]	2,54E+01	4,29E+00	1,28E+02	8,97E+02	1,34E+01	6,71E+01	9,67E+00	1,53E+00	1,59E+00	1,17E+00	1,38E+01	1,98E+02	2,73E+01	1,56E+00
Ionizing radiation HH [kBq U235 eq]	6,10E+02	1,92E+02	1,43E+04	3,30E+03	4,80E+02	3,88E+03	1,32E+03	6,33E+01	6,46E+01	4,87E+01	1,88E+03	8,05E+03	1,04E+04	1,85E+02
Ionizing radiation E (interim) [CTUe]	4,42E-03	1,38E-03	1,04E-01	2,40E-02	3,50E-03	2,79E-02	9,36E-03	4,49E-04	4,59E-04	3,46E-04	1,33E-02	5,71E-02	7,77E-02	1,86E-03
Photochemical ozone formation [kg NMVOC eq]	1,26E+02	3,08E+01	1,40E+03	2,84E+02	3,52E+01	6,58E+02	6,02E+01	1,68E+01	1,70E+01	1,29E+01	8,59E+01	2,15E+03	1,59E+02	3,97E+01
Acidification [molc H+ eq]	1,63E+02	6,14E+01	1,56E+03	6,33E+02	7,34E+01	8,89E+02	6,82E+01	1,21E+01	1,25E+01	9,34E+00	9,72E+01	1,56E+03	4,12E+02	4,93E+01
Terrestrial eutrophication [molc N eq]	3,26E+02	1,16E+02	4,33E+03	1,04E+03	1,23E+02	2,44E+03	1,42E+02	6,04E+01	6,10E+01	4,65E+01	2,02E+02	7,74E+03	5,45E+02	1,47E+02
Freshwater eutrophication [kg P eq]	2,06E+00	2,01E-01	9,35E+00	7,03E+00	5,76E-01	3,15E+00	5,04E-01	7,76E-03	1,10E-02	5,97E-03	7,19E-01	8,50E-01	7,85E+00	4,25E+01
Marine eutrophication [kg N eq]	2,85E+01	9,98E+00	3,90E+02	8,66E+01	9,72E+00	2,15E+02	1,26E+01	5,51E+00	5,56E+00	4,24E+00	1,80E+01	7,06E+02	5,05E+01	1,34E+01
Freshwater ecotoxicity [CTUe]	4,66E+04	1,79E+03	8,05E+04	1,13E+05	5,43E+03	2,48E+04	4,00E+04	1,88E+02	2,58E+02	1,44E+02	5,70E+04	2,16E+04	2,07E+04	4,54E+03
Land use [kg C deficit]	2,82E+04	6,99E+03	3,13E+05	2,65E+05	9,19E+04	1,85E+05	3,26E+04	7,33E+02	7,77E+02	5,64E+02	4,65E+04	9,35E+04	3,22E+04	0,00E+00
Water resource depletion [m3 water eq]	2,13E+04	2,71E+03	1,97E+05	8,38E+04	8,36E+03	6,81E+04	5,66E+03	1,39E+02	1,97E+02	1,07E+02	8,07E+03	1,68E+04	2,82E+05	1,17E+00
Mineral, fossil & ren resource depletion [kg Sb eq]	1,78E+00	3,22E-01	1,34E+01	1,33E+02	3,18E-01	2,53E+00	1,10E+00	7,08E-03	9,64E-03	5,45E-03	1,57E+00	8,14E-01	6,31E-01	3,83E-03

Tabella 4.4: Impatti dei materiali ed operazioni per ogni categoria – Scenario I Consequential b

Impact category	Electricity recycling concrete, bricks, ceramics	Electricity recycling wood	Electricity recycling steel	Reinforcing steel	Glass	Gravel	Wood chips
Climate change [kg CO ₂ eq]	1,64E+04	7,14E+01	1,20E+05	-8,15E+04	-9,74E+01	-5,45E+04	-1,62E+03
Ozone depletion [kg CFC-11 eq]	1,70E-03	7,41E-06	1,24E-02	-3,06E-03	-3,83E-06	-2,87E-03	-1,57E-04
Human toxicity, non-cancer effects [CTUh]	9,46E-04	4,12E-06	5,42E-03	-1,88E-02	-6,45E-06	-5,48E-03	-3,51E-03
Human toxicity, cancer effects [CTUh]	1,35E-04	5,88E-07	5,13E-04	-9,98E-03	-7,01E-07	-8,54E-04	-3,51E-04
Particulate matter [kg PM _{2.5} eq]	5,69E+00	2,48E-02	4,05E+01	-6,86E+01	-9,20E-02	-4,40E+01	-3,14E+00
Ionizing radiation HH [kBq U235 eq]	2,16E+03	9,42E+00	1,60E+04	-1,65E+03	-3,24E+00	-3,06E+03	-1,19E+02
Ionizing radiation E (interim) [CTUe]	1,62E-02	7,06E-05	1,20E-01	-1,20E-02	-2,31E-05	-2,21E-02	-8,62E-04
Photochemical ozone formation [kg NMVOC eq]	3,31E+01	1,44E-01	2,39E+02	-3,41E+02	-5,10E-01	-3,37E+02	-1,62E+01
Acidification [molc H+ eq]	8,59E+01	3,74E-01	6,13E+02	-4,40E+02	-7,99E-01	-4,55E+02	-2,38E+01
Terrestrial eutrophication [molc N eq]	1,14E+02	4,95E-01	8,22E+02	-8,81E+02	-1,78E+00	-1,24E+03	-4,23E+01
Freshwater eutrophication [kg P eq]	1,64E+00	7,13E-03	1,05E+01	-5,57E+00	-3,29E-03	-2,41E+00	-3,38E-01
Marine eutrophication [kg N eq]	1,05E+01	4,58E-02	7,62E+01	-7,71E+01	-1,60E-01	-1,07E+02	-3,65E+00
Freshwater ecotoxicity [CTUe]	4,32E+03	1,88E+01	2,21E+04	-1,26E+05	-2,96E+01	-2,48E+04	-5,20E+04
Land use [kg C deficit]	6,71E+03	2,92E+01	4,56E+04	-7,63E+04	-3,51E+02	-5,21E+05	-8,09E+03
Water resource depletion [m ³ water eq]	5,87E+04	2,56E+02	4,28E+05	-5,76E+04	-3,14E+01	-5,84E+04	-3,40E+03
Mineral, fossil & ren resource depletion [kg Sb eq]	1,32E-01	5,73E-04	7,06E-01	-4,82E+00	-3,29E-03	-1,15E+01	-1,38E+01

Climate change

Il principale impatto al quale oggi si presta la maggiore attenzione è il cambiamento climatico; ciò è dovuto al notevole contributo che hanno le attività umane sul riscaldamento globale. Per tale categoria i risultati, con e senza riciclo, sono riportati sull'istogramma sottostante (Figure 4.4 e 4.5). L'unità di misura sono i kg CO₂ equivalente.

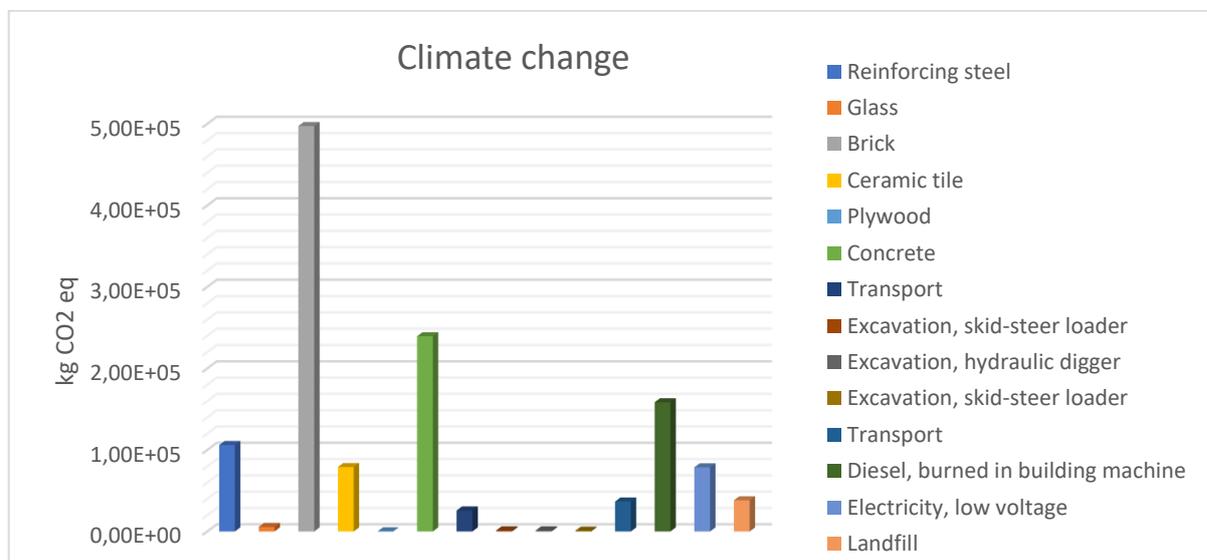


Figura 4.4: Climate change Scenario I

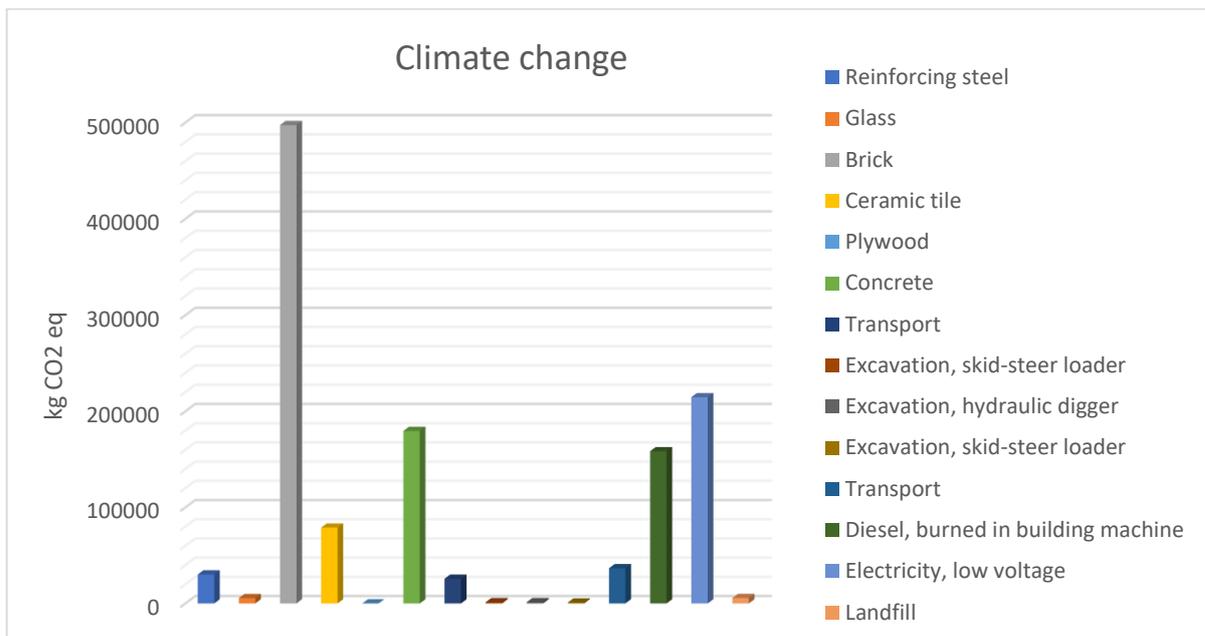


Figura 4.5: Climate change Scenario I Consequential

Dai risultati dell'analisi senza riciclo si nota come i principali contributi siano dati dai mattoni (39.12%), cemento (18.88%), acciaio (8.35%), materiali ceramici (6.22%), discarica (3.01%), consumi fossili (12.49%) ed energetici (6.2%). Come già anticipato l'impatto maggiore è dato dalla produzione dei nuovi materiali che andranno a costituire l'edificio e in minor misura dai consumi per i macchinari.

I mattoni, uniti ai materiali ceramici, costituiscono una buona percentuale dell'impatto globale, ciò è dovuto alle relative operazioni di produzione e trasporto della grande quantità di materiale da dover realizzare. Come dimostrato da Thormarck C. (2000) [42] il notevole impatto indotto da questi materiali può essere abbattuto, con notevoli benefici, nel caso in cui questo materiale venga riusato tale e quale (operazione di *rebrick*) [26]. Si presentano alcuni limiti all'applicazione di tale soluzione per la certificazione del materiale. La soluzione alternativa proposta nel seguente lavoro si basa sul riuso del materiale andando a tritularlo e riutilizzarlo per la costruzione di sottofondi stradali. Si avrà un dispendio di energia per tritularlo ma questa sarà comunque minore rispetto a quella necessaria per estrarre e tritare del materiale vergine. La percentuale dell'impatto per i mattoni e i materiali ceramici, rispettivamente 40.24% e 6.38%, è leggermente aumentata, questa però è caratterizzata dal medesimo valore di kg CO₂ eq (497311, 78908); nonostante il riciclo infatti, per la nuova costruzione, sarà necessario produrre del nuovo materiale. Il materiale riciclato non entrerà nel ciclo della nuova struttura.

Il secondo principale impatto è quello indotto dalla produzione del cemento. A livello mondiale la sola produzione di tale materiale (estrazione delle materie prime e produzione) consuma il 3% di energia ed emette il 6% dei gas serra [43]. Un impatto su larga scala non

trascurabile. Tale materiale, necessario per la realizzazione della struttura portante, nel caso di riciclo presenta un impatto minore (14.53%) passando da 239378 kg CO₂ eq a 179535 kg CO₂ eq; ciò è dovuto al riuso del vecchio calcestruzzo. Il detrito durante il riciclo viene tritato producendo un nuovo aggregato che può essere impiegato per la realizzazione del conglomerato cementizio della nuova struttura. Il risultato ottenuto è in linea con la diminuzione delle emissioni come stabilito da Knoeri C. (2012) [44].

L'impatto successivo, benché presente in quantità minori, è quello indotto dall'acciaio la cui produzione richiede un notevole consumo di energia; queste possono essere abbattute se si usa materiale riciclato (temperature di fusione minori) con conseguente abbattimento delle emissioni di CO₂ [23]. Essendo l'acciaio un materiale riciclabile al 100%, con il riciclo la percentuale d'impatto diminuisce (2.44%) e con essa diminuisce anche il quantitativo di kg CO₂ eq prodotto. Per la produzione del medesimo quantitativo di acciaio, passando da una condizione di acciaio di nuova produzione ad una condizione con acciaio riciclato, la riduzione delle emissioni rispetta quanto detto da Broadbent C. (2016) [45].

I consumi energetici per il parco macchine emettono circa un quinto dell'impatto globale; ciò è determinato dal grande consumo di carburante fossile per i macchinari mobili e dal consumo di corrente elettrica per i macchinari fissi. Mentre i consumi dei combustibili fossili risulteranno invariati, nel caso del riciclo i consumi elettrici saranno maggiori per permettere appunto il riciclo. Le operazioni di triturazione o fusione richiederanno un certo consumo di energia elettrica (17.37% e 183166 kg CO₂ eq).

L'ultimo impatto importante è dato dal deposito delle macerie in discarica. Questo non ha un impatto rilevante per il riscaldamento globale, però, come vedremo inseguito, questo abbandono determinerà un inquinamento del terreno e della falda. In generale il riciclo abatterà quasi del tutto l'impatto indotto da questa operazione (0.5%) passando da 38155 di kg CO₂ eq a 5640 kg CO₂ eq.

Ozone depletion

La riduzione della fascia di ozono stratosferico mostrato nelle *Figure 4.6* e *4.7* presenta un andamento e delle percentuali molto simili a quelle del riscaldamento globale.

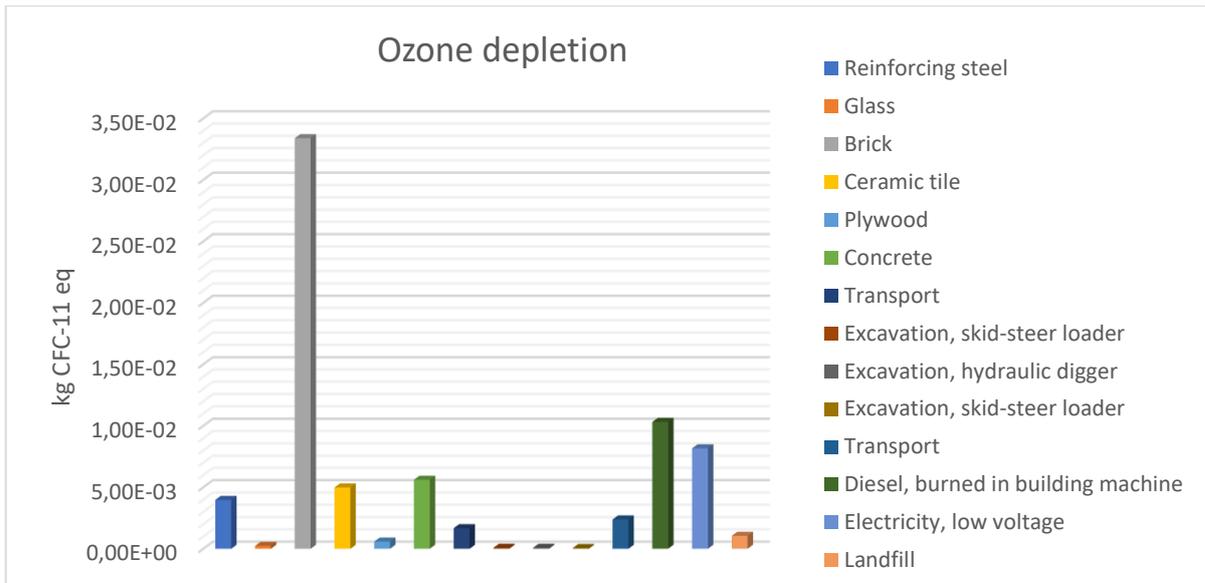


Figura 4.6: Ozone depletion Scenario I

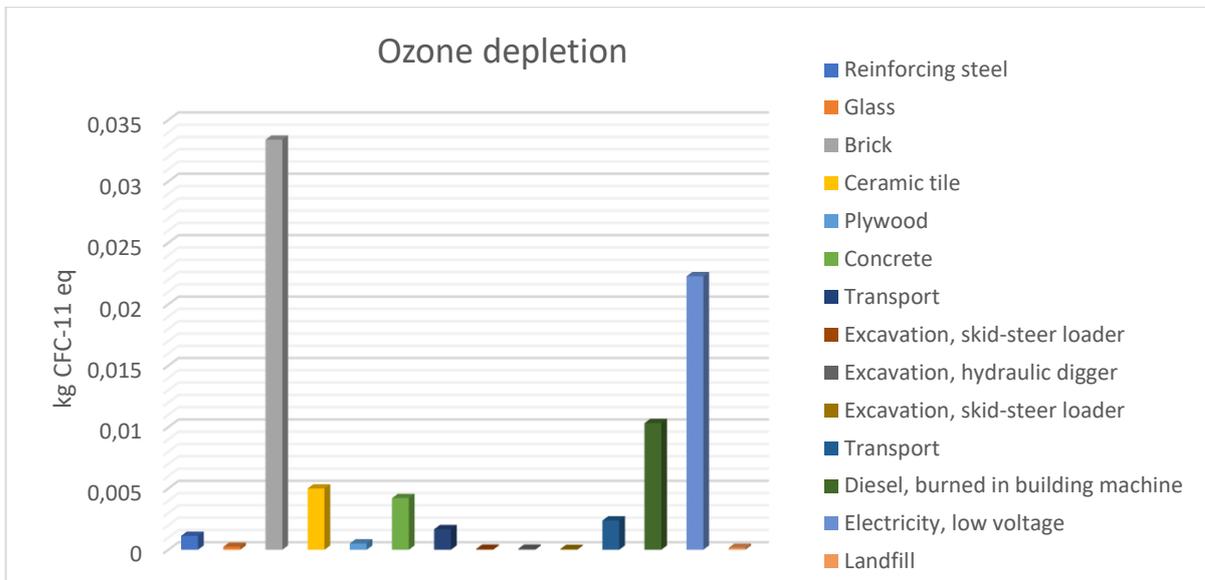


Figura 4.7: Ozone depletion Scenario I Consequential

I materiali più impattanti, sempre legato all'elevato quantitativo in massa, sono i mattoni (45.99%); seguono gli altri materiali: acciaio (5.48%), cemento (7.72%), materiali ceramici (6.22%). Le emissioni indotte dai consumi dei mezzi conducono, per questa categoria, a degli impatti maggiori: combustibili fossili (14.2%), energia elettrica (11.25%). In maniera analoga all'impatto precedente, nel caso di riciclo, tenderanno a ridursi i kg CFC-11 eq per materiali riciclati mentre tenderanno ad aumentare quelli dell'energia necessaria al riciclo.

Human health (cancer/ non cancer effects)

La terza categoria valutata è legata alla salute umana. Questa può condurre a cancro o ad altri effetti dannosi per l'organismo. Nelle *Figure 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11* vengono mostrati gli impatti indotti dai vari materiali e operazioni.

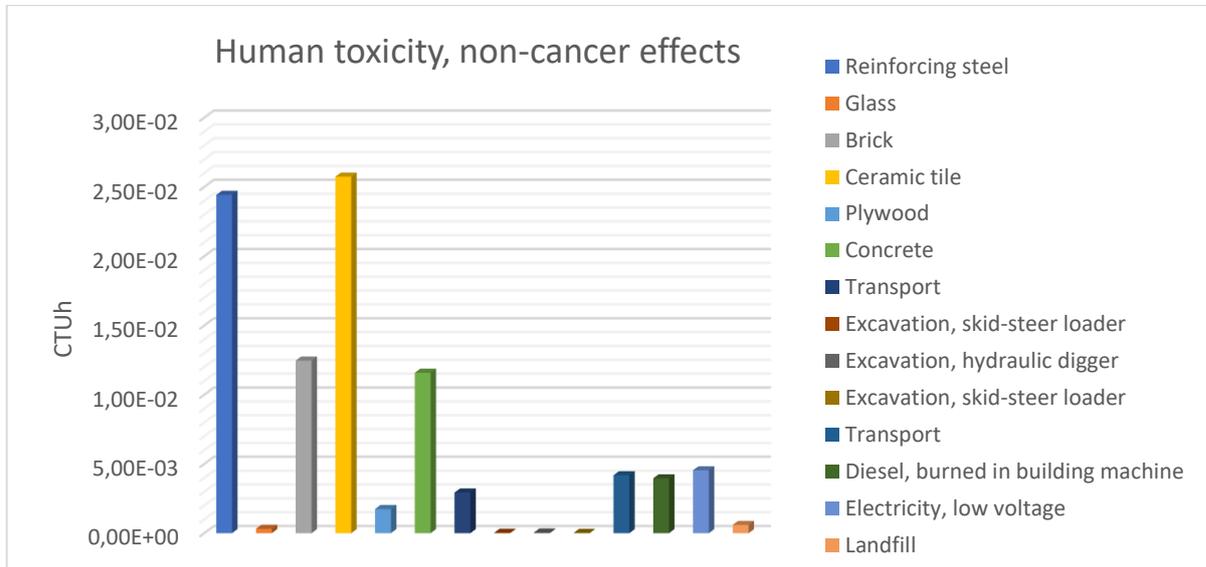


Figura 4.8: Human toxicity, non cancer effects, Scenario I

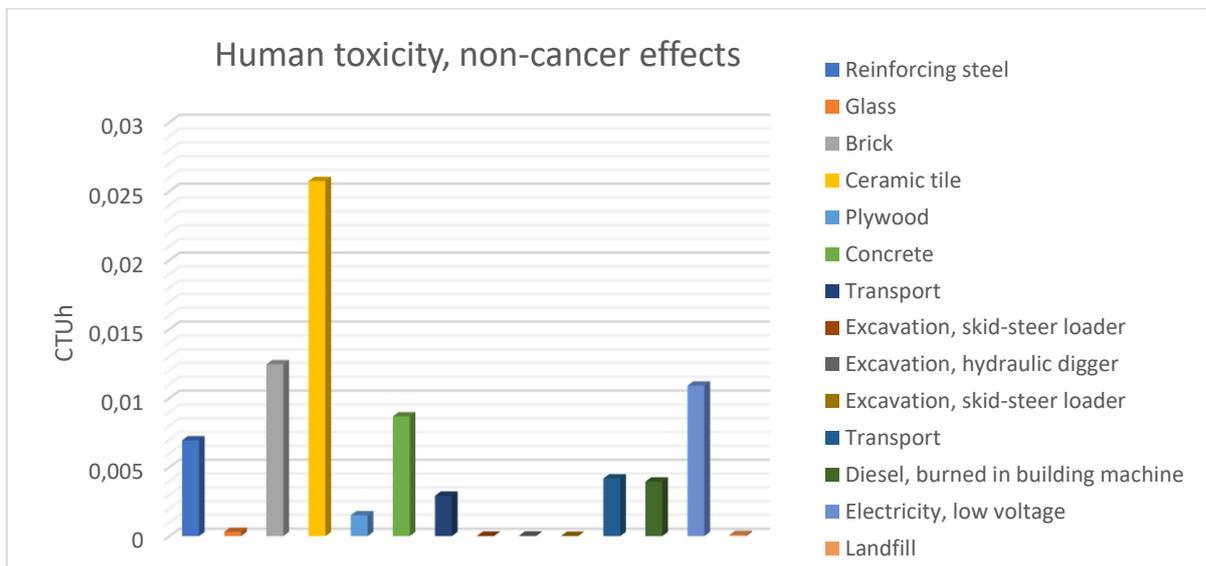


Figura 4.9: Human toxicity, non cancer effects, Scenario I Consequential

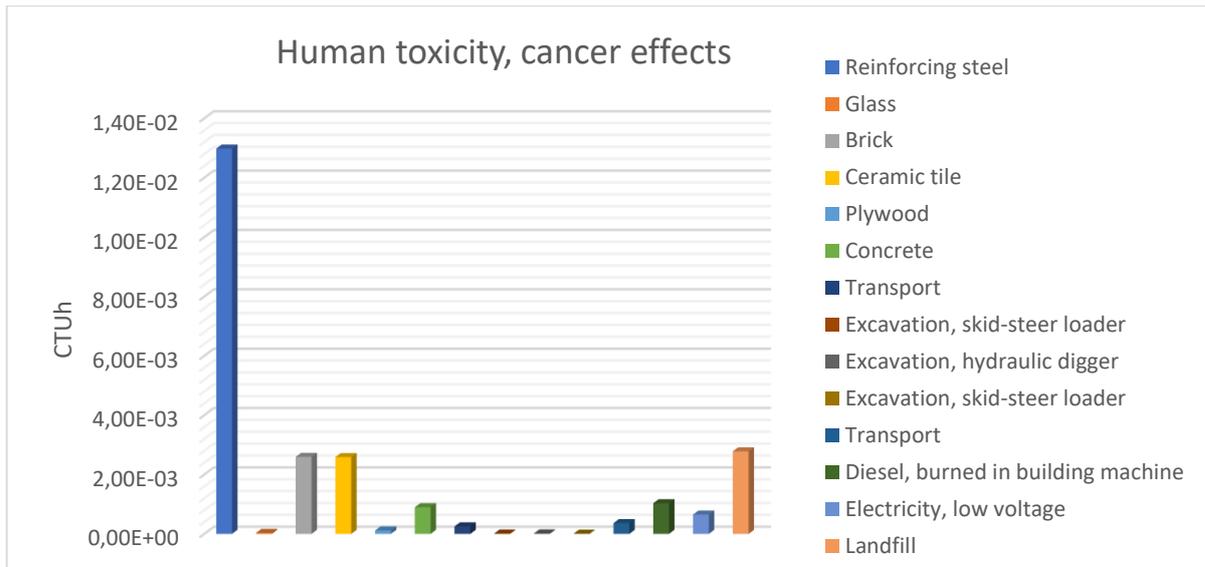


Figura 4.10: Human toxicity, cancer effects, Scenario I

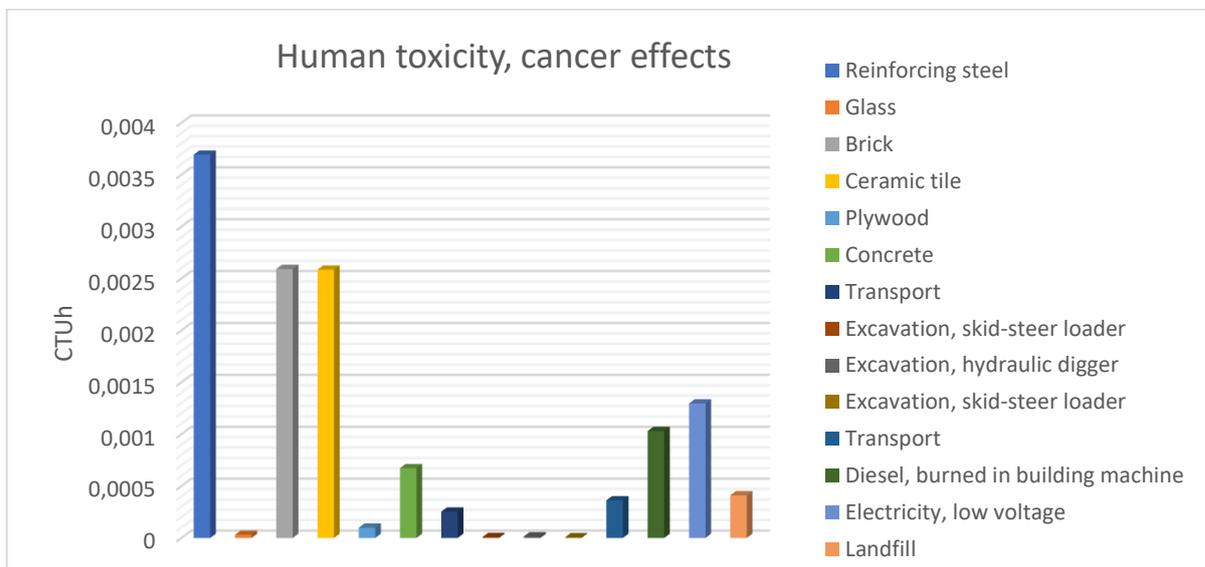


Figura 4.11: Human toxicity, cancer effects, Scenario I Consequential

L'unità di misura adottata è la CTUh (Comparative Toxic Unit for Human Health).

Si può notare da subito come, per la condizione senza riciclo, il parametro che maggiormente influenza l'impatto (per entrambi gli effetti sulla salute) sia l'acciaio: 26.39% per gli effetti non cancerogeni e 53.41% per quelli cancerogeni con valori rispettivamente pari a 0.0925 CTUh e 0.0244 CTUh. Un impatto così elevato è dovuto alle notevoli emissioni tossiche durante la produzione del materiale stesso (Burchart-korol, 2013) [46]. Nel caso di riciclo queste percentuali, e i relativi valori di CTUh, si riducono notevolmente essendo minore il quantitativo di nuovo materiale da realizzare; si passa infatti a 0.0069 CTUh per i non cancerogeni a 0.0018 per i cancerogeni (un ordine di grandezza in meno). Come già anticipato, sfruttando il riuso dei rottami risulta possibile abbassare la temperatura di fusione e l'estrazione dei minerali di base.

I materiali ceramici invece, benché presentino dei valori che non variano passando dalla condizione senza a quello con riciclo (mattoni 0.0124 CTUh e ceramici 0.0257CTUh), risulteranno essere i più impattanti per questa seconda soluzione. L'abbattimento delle emissioni dell'acciaio renderà la produzione di questi materiali la più dannosa per la salute umana.

Particulate matter

L'inquinamento atmosferico provocato da aerosol primari e secondari nell'atmosfera può avere un impatto negativo importante sulla salute umana. Le *Figure 4.12 e 4.13* mostrano il relativo impatto indotto dell'emissione di tali particelle nell'aria. L'unità di misura adottata è kg PM 2.5 eq.

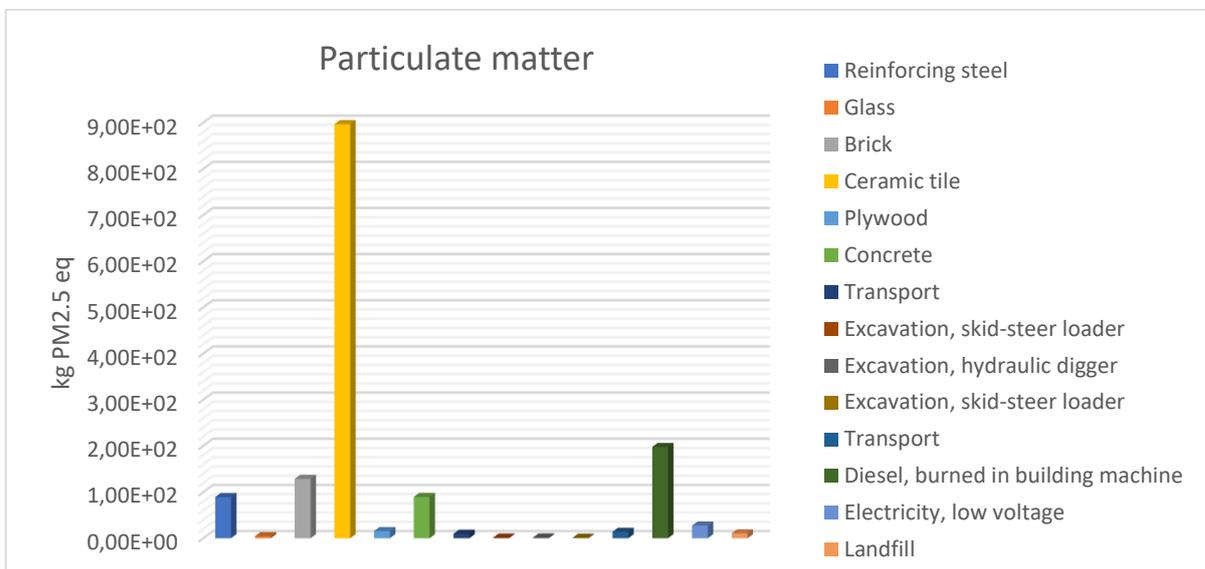


Figura 4.12: Particulate matter Scenario I

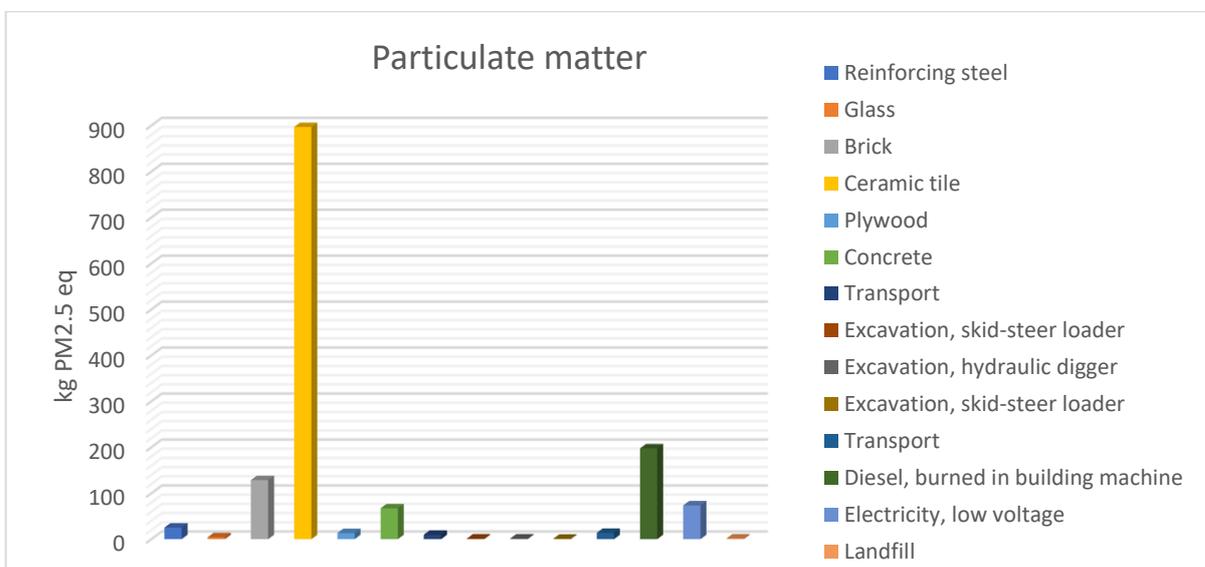


Figura 4.13: Particulate matter Scenario I Consequential

Sono sempre i materiali edili a determinare il maggior impatto. I materiali ceramici impattano per il 60% (896.8 CTUh) seguiti dai mattoni (128.5CTUh) e il calcestruzzo (89.5 CTUh). Un secondo contributo importante è dato dai consumi energetici dei mezzi d’opera; ad esempio, nel caso del riciclo i valori sono i seguenti: 197.55 CTUh per il diesel e 73.49 CTUh per l’energia elettrica

Freshwater eutrophication

L’eutrofizzazione è una tipologia di inquinamento indotta dal deposito o scarico di sostanze nel terreno (falda) o corsi d’acqua. Le *Figure 4.14 e 4.15* mostrano il relativo impatto. L’unità di misura adottata è kg P eq (chilogrammi di fosforo equivalente).

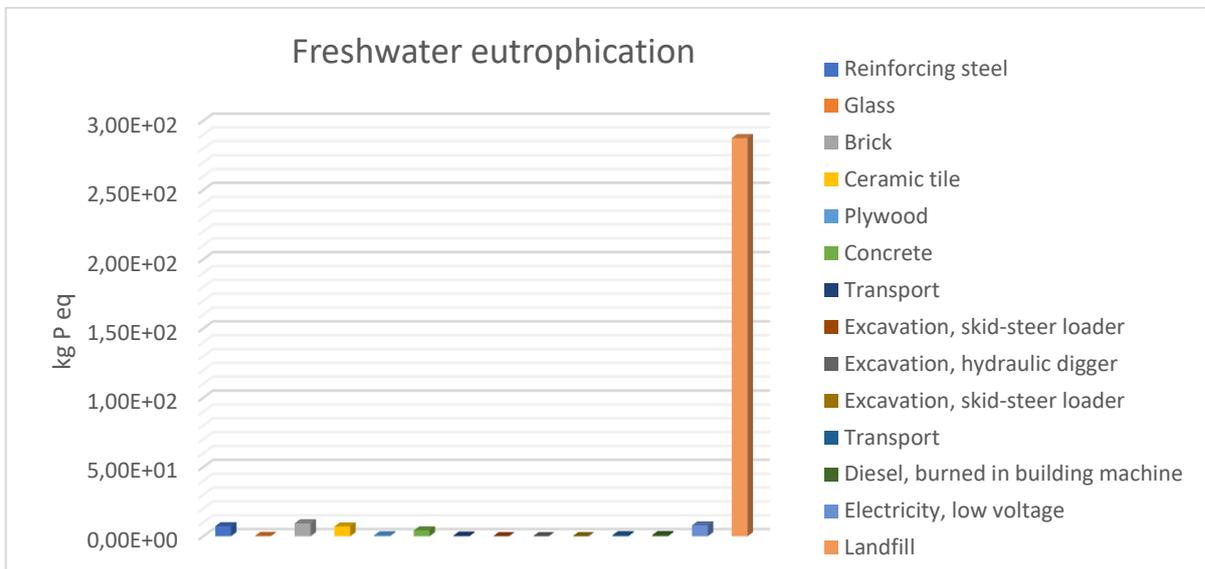


Figura 4.14: Freshwater eutrophication Scenario I

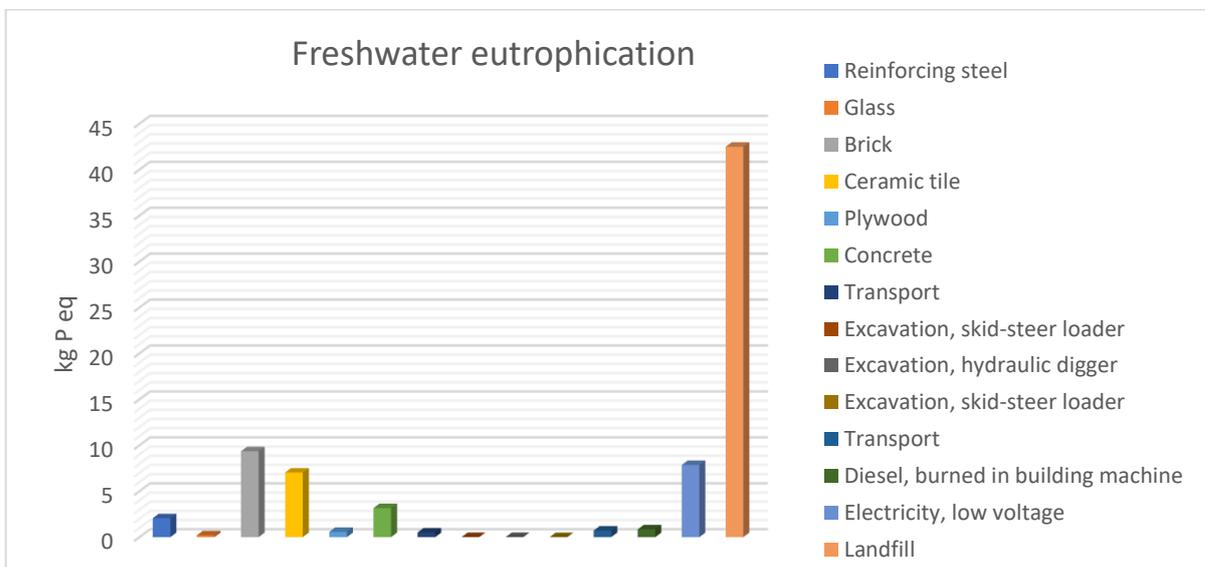


Figura 4.15: Freshwater eutrophication Scenario I Consequential

Come anticipato questa categoria valuta l'inquinamento indotto dal deposito o scarico di materiale; si può infatti notare come il maggior impatto di questa categoria si indotto dal deposito in discarica. Senza riciclo la discarica contribuisce con l'88% e 287.47 kg di P eq. L'operazione di riciclo permette di abbattere l'abbandono del materiale, di conseguenza si viene a determinare anche una diminuzione della percentuale (48.86%). L'effetto del riciclo lo si può notare maggiormente sulla riduzione del valore effettivo (42.49 kg di P eq). La ricerca di Wassermann G. (2005) [47] dimostra come il notevole impatto del riciclo sulla eutrofizzazione possa essere abbattuto riducendo il quantitativo di materiale depositato in discarica.

Land use

La seguente categoria d'impatto (*Figure 4.16 e 4.17*) valuta l'uso del suolo e il danno agli ecosistemi dovuto all'occupazione e/o alla trasformazione della terra.

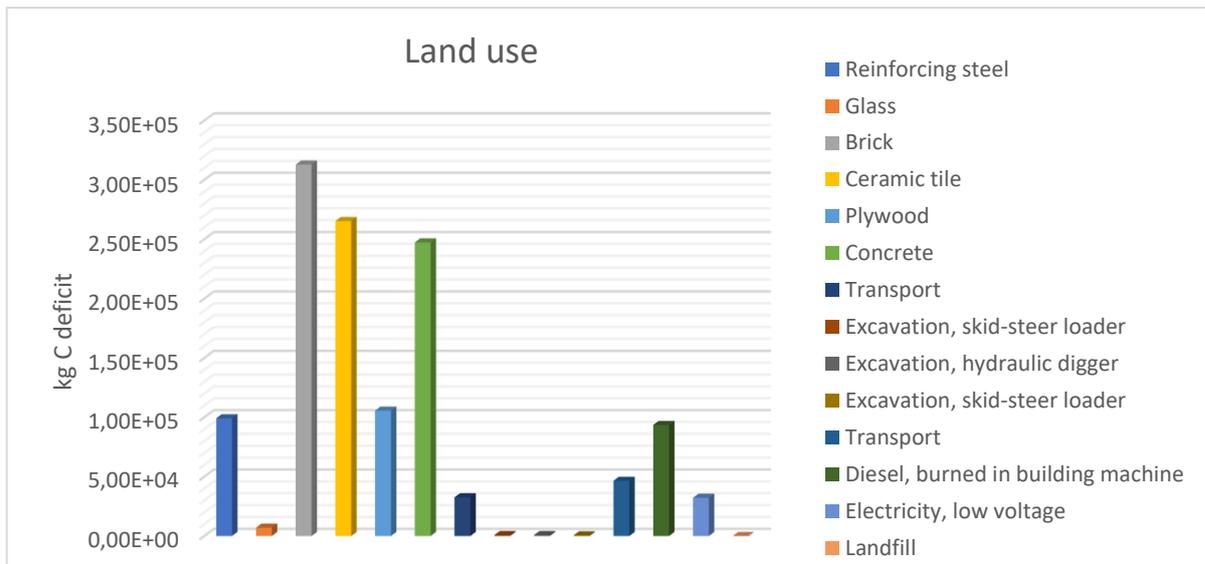


Figura 4.16: Land use Scenario I

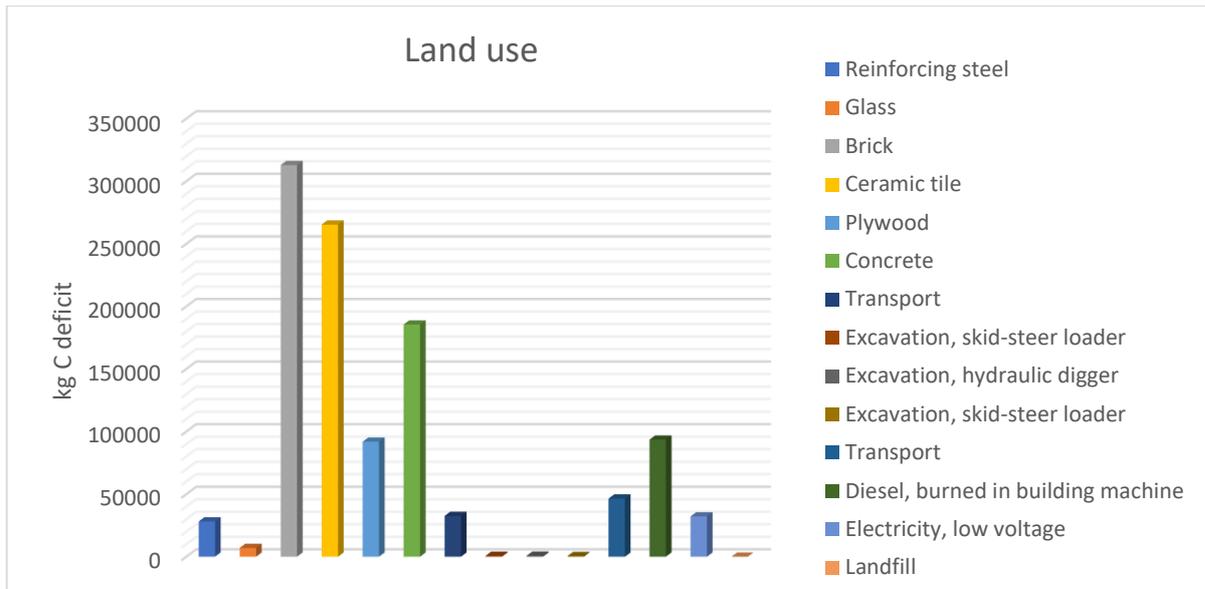


Figura 4.17: Land use Scenario I Consequential

L'unità di misura adottata è kg C deficit. Secondo quanto affermato precedentemente si può notare come siano i materiali ad impattare maggiormente: I mattoni, i ceramici, il calcestruzzo ed il legno per la loro natura legata alla trasformazione o uso della terra determino il maggior effetto, i valori sono in percentuale e kg C deficit sono rispettivamente 25.15% e 312860 kg C deficit, 21.33% e 265305 kg C deficit, 19.88% e 247235 kg C deficit, 8.49% e 105594 kg C deficit. L'effetto del riciclo, per i materiali che verranno riusati nella nuova struttura, andrà a determinare una riduzione marginale dei valori del calcestruzzo (185450 kg C deficit) e del legno (91893 kg C deficit).

Mineral, fossil, and energy resource depletion

L'ultima categoria valutata è legata alla riduzione delle materie prime e consumi energetici. Nelle *Figure 4.18* e *4.19* vengono mostrati gli impatti indotti dall'utilizzo dei vari materiali e dal consumo di energia per le varie operazioni. L'unità di misura adottata è kg Sb eq (chilogrammi di antimonio equivalente).

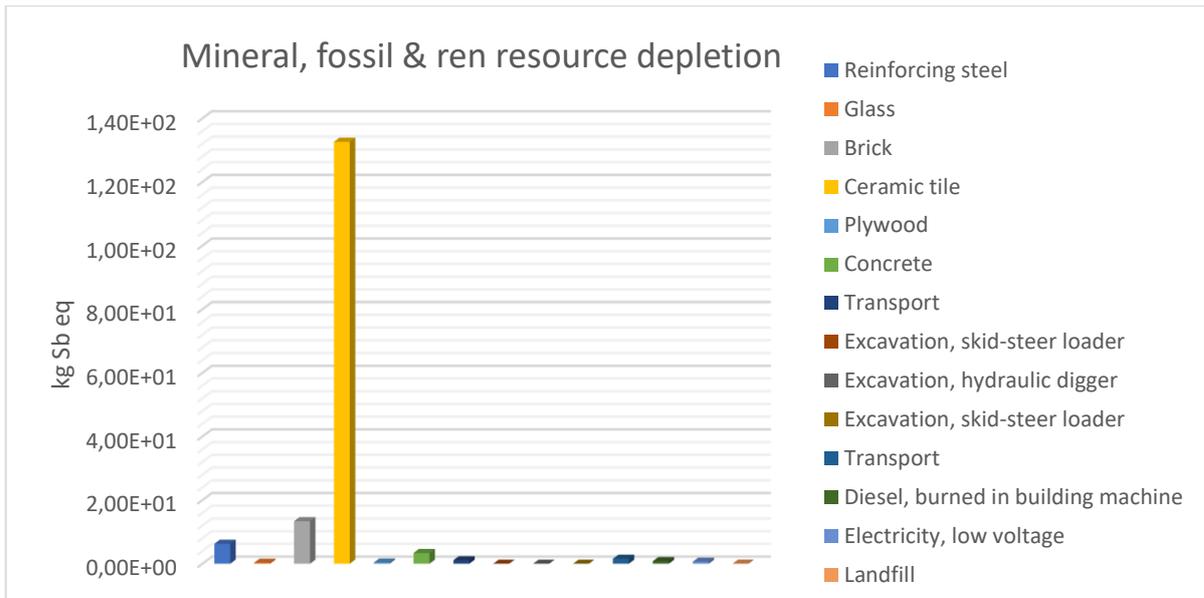


Figura 4.18: Mineral, fossil and energy resource depletion Scenario I

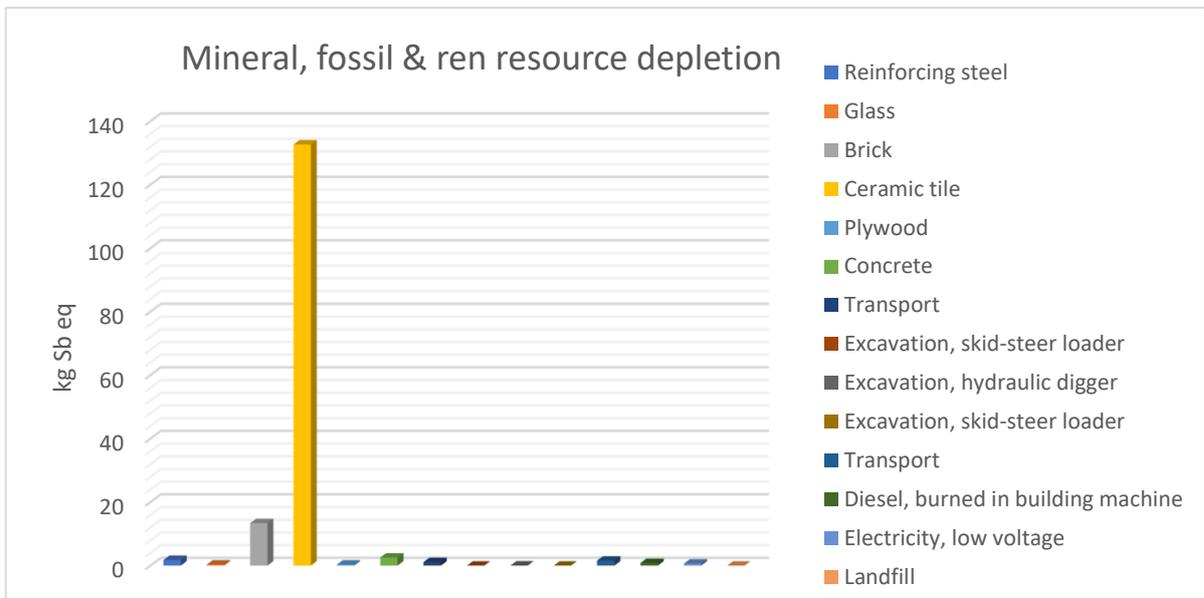


Figura 4.19: Mineral, fossil and energy resource depletion Scenario I Consequential

L'impatto che predomina maggiormente (quasi in assoluto) è quello indotto dalla produzione dei materiali ceramici: 132.64 kg Sb eq (82.64%). L'impatto successivo è quello indotto dalla produzione dei mattoni con valori e percentuali inferiori: 13.37 kg Sb eq (8.33%). L'operazione di riciclo non determina una diminuzione dei relativi valori i quali rimangono identici; questo perché come già detto, anche se il materiale in questione viene riciclato producendone uno nuovo, non può essere riusato nella nuova opera.

4.3 Impatti ambientali del ciclo vita della demolizione e ricostruzione – Scenario II/Scenario II Consequential

Il secondo scenario (realizzazione dell'esoscheletro) è strutturato in maniera tale da ridurre al minimo la produzione di macerie (poco invasivo). A causa della ridotta produzione di scarti il beneficio indotto dal riciclo è piccolo rispetto allo Scenario I. Partendo da quanto asserito per semplificazione dell'analisi si è valutata la soluzione del solo Scenario II Consequential. I risultati per tale scenario vengono riportati nelle *Tabelle 4.5 e 4.6*. Sono mostrati in queste tabelle gli "impact score" associati ad ogni materiale o processo lavorativo. Come per lo Scenario I tutti i dati sono normalizzati in riferimento ad un'unica base (*Figura 4.20*); risulta possibile a partire da ciò confrontare i risultati per le varie categorie d'impatto e valutare come una singola operazione o materiale vari da una categoria all'altra.

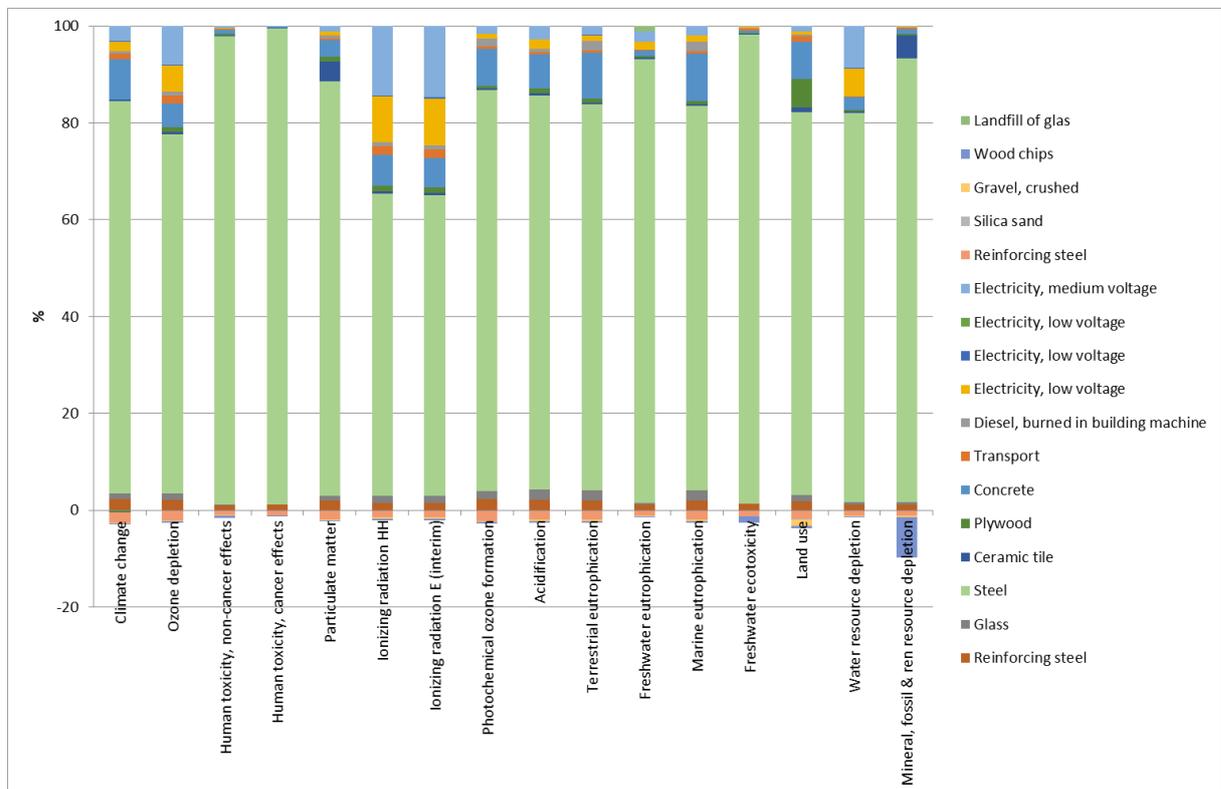


Figura 4.20: Impatti Scenario II Consequential

Dai dati riportati nell'istogramma precedente si osserva chiaramente come ad incidere maggiormente, in maniera predominante, sulle varie categorie d'impatto sia l'acciaio necessari per realizzare l'involucro esterno. Questo notevole impatto è indotto dal notevole quantitativo di acciaio necessario alla realizzazione della struttura. Le categorie d'impatto valutate sono le medesime a quelle dello Scenario I (*Tabelle 4.5 e 4.6*).

Tabella 4.5: Impatti dei materiali ed operazioni per ogni categoria – Scenario II Consequential a

Impact category	Reinforcing steel	Glass	Brick	Ceramic tile	Plywood	Concrete	Transport	Excavation, skid-steer loader	Excavation, hydraulic digger	Excavation, skid-steer loader	Transport	Diesel	Electricity, low voltage	Landfill
Climate change [kg CO2 eq]	1,07E+04	5,51E+03	3,78E+05	1,59E+03	-1,80E+03	3,93E+04	4,87E+03	2,17E+03	2,46E+04	8,89E+01	1,07E+04	5,51E+03	3,78E+05	1,59E+03
Ozone depletion [kg CFC-11 eq]	4,02E-04	2,36E-04	1,39E-02	1,00E-04	1,73E-04	9,21E-04	3,17E-04	1,41E-04	2,55E-03	2,45E-06	4,02E-04	2,36E-04	1,39E-02	1,00E-04
Human toxicity, non-cancer effects [CTUh]	2,47E-03	3,16E-04	2,20E-01	5,17E-04	5,14E-04	1,90E-03	5,56E-04	5,42E-05	1,24E-03	1,38E-06	2,47E-03	3,16E-04	2,20E-01	5,17E-04
Human toxicity, cancer effects [CTUh]	1,31E-03	3,03E-05	1,05E-01	5,20E-05	3,37E-05	1,47E-04	4,81E-05	1,41E-05	1,45E-04	6,47E-06	1,31E-03	3,03E-05	1,05E-01	5,20E-05
Particulate matter [kg PM2.5 eq]	9,00E+00	4,29E+00	3,77E+02	1,80E+01	4,55E+00	1,47E+01	1,83E+00	2,71E+00	8,40E+00	2,45E-02	9,00E+00	4,29E+00	3,77E+02	1,80E+01
Ionizing radiation HH [kBq U235 eq]	2,17E+02	1,92E+02	8,50E+03	6,62E+01	1,63E+02	8,50E+02	2,49E+02	1,10E+02	1,29E+03	2,92E+00	2,17E+02	1,92E+02	8,50E+03	6,62E+01
Ionizing radiation E (interim) [CTUe]	1,57E-03	1,38E-03	6,17E-02	4,82E-04	1,19E-03	6,10E-03	1,77E-03	7,82E-04	9,66E-03	2,93E-05	1,57E-03	1,38E-03	6,17E-02	4,82E-04
Photochemical ozone formation [kg NMVOC eq]	4,48E+01	3,08E+01	1,58E+03	5,70E+00	1,20E+01	1,44E+02	1,14E+01	2,94E+01	1,97E+01	6,26E-01	4,48E+01	3,08E+01	1,58E+03	5,70E+00
Acidification [molc H+ eq]	5,78E+01	6,14E+01	2,24E+03	1,27E+01	2,49E+01	1,95E+02	1,29E+01	2,14E+01	5,12E+01	7,77E-01	5,78E+01	6,14E+01	2,24E+03	1,27E+01
Terrestrial eutrophication [molc N eq]	1,16E+02	1,16E+02	4,45E+03	2,09E+01	4,18E+01	5,33E+02	2,68E+01	1,06E+02	6,77E+01	2,32E+00	1,16E+02	1,16E+02	4,45E+03	2,09E+01
Freshwater eutrophication [kg P eq]	7,31E-01	2,01E-01	5,51E+01	1,41E-01	1,96E-01	6,91E-01	9,56E-02	1,16E-02	9,76E-01	6,70E-01	7,31E-01	2,01E-01	5,51E+01	1,41E-01
Marine eutrophication [kg N eq]	1,01E+01	9,98E+00	3,87E+02	1,74E+00	3,30E+00	4,72E+01	2,40E+00	9,67E+00	6,27E+00	2,12E-01	1,01E+01	9,98E+00	3,87E+02	1,74E+00
Freshwater ecotoxicity [CTUe]	1,65E+04	1,79E+03	1,25E+06	2,27E+03	1,84E+03	5,44E+03	7,58E+03	2,96E+02	2,57E+03	7,15E+01	1,65E+04	1,79E+03	1,25E+06	2,27E+03
Land use [kg C deficit]	1,00E+04	6,99E+03	4,17E+05	5,33E+03	3,12E+04	4,06E+04	6,18E+03	1,28E+03	4,00E+03	0,00E+00	1,00E+04	6,99E+03	4,17E+05	5,33E+03
Water resource depletion [m3 water eq]	7,56E+03	2,71E+03	4,86E+05	1,68E+03	2,84E+03	1,49E+04	1,07E+03	2,31E+02	3,50E+04	1,84E-02	7,56E+03	2,71E+03	4,86E+05	1,68E+03
Mineral, fossil & ren resource depletion [kg Sb eq]	6,34E-01	3,22E-01	5,09E+01	2,67E+00	1,08E-01	5,53E-01	2,09E-01	1,11E-02	7,84E-02	6,04E-05	6,34E-01	3,22E-01	5,09E+01	2,67E+00

Tabella 4.6: Impatti dei materiali ed operazioni per ogni categoria – Scenario II Consequential b

Impact category	Electricity recycling concrete, bricks, ceramics	Electricity recycling wood	Electricity recycling steel	Reinforcing steel	Glass	Gravel	Wood chips
Climate change [kg CO2 eq]	2,32E+02	2,42E+01	1,45E+04	-1,00E+04	-9,74E+01	-7,85E+02	-5,48E+02
Ozone depletion [kg CFC-11 eq]	2,41E-05	2,52E-06	1,51E-03	-3,76E-04	-3,83E-06	-4,14E-05	-5,33E-05
Human toxicity, non-cancer effects [CTUh]	1,34E-05	1,40E-06	6,59E-04	-2,31E-03	-6,45E-06	-7,89E-05	-1,19E-03
Human toxicity, cancer effects [CTUh]	1,91E-06	2,00E-07	6,23E-05	-1,23E-03	-7,01E-07	-1,23E-05	-1,19E-04
Particulate matter [kg PM2.5 eq]	8,04E-02	8,41E-03	4,92E+00	-8,43E+00	-9,20E-02	-6,35E-01	-1,07E+00
Ionizing radiation HH [kBq U235 eq]	3,06E+01	3,20E+00	1,95E+03	-2,03E+02	-3,24E+00	-4,40E+01	-4,04E+01
Ionizing radiation E (interim) [CTUe]	2,29E-04	2,40E-05	1,46E-02	-1,47E-03	-2,31E-05	-3,19E-04	-2,93E-04
Photochemical ozone formation [kg NMVOC eq]	4,68E-01	4,90E-02	2,90E+01	-4,19E+01	-5,10E-01	-4,86E+00	-5,48E+00
Acidification [molc H+ eq]	1,21E+00	1,27E-01	7,44E+01	-5,41E+01	-7,99E-01	-6,56E+00	-8,07E+00
Terrestrial eutrophication [molc N eq]	1,61E+00	1,68E-01	9,99E+01	-1,08E+02	-1,78E+00	-1,79E+01	-1,44E+01
Freshwater eutrophication [kg P eq]	2,32E-02	2,42E-03	1,28E+00	-6,84E-01	-3,29E-03	-3,47E-02	-1,15E-01
Marine eutrophication [kg N eq]	1,49E-01	1,56E-02	9,26E+00	-9,48E+00	-1,60E-01	-1,54E+00	-1,24E+00
Freshwater ecotoxicity [CTUe]	6,11E+01	6,39E+00	2,69E+03	-1,55E+04	-2,96E+01	-3,57E+02	-1,77E+04
Land use [kg C deficit]	9,49E+01	9,93E+00	5,54E+03	-9,37E+03	-3,51E+02	-7,50E+03	-2,75E+03
Water resource depletion [m3 water eq]	8,31E+02	8,69E+01	5,20E+04	-7,08E+03	-3,14E+01	-8,42E+02	-1,15E+03
Mineral, fossil & ren resource depletion [kg Sb eq]	1,86E-03	1,95E-04	8,57E-02	-5,93E-01	-3,29E-03	-1,65E-01	-4,67E+00

Climate change

I risultati del cambiamento climatico con riciclo per la configurazione strutturale ad esoscheletro sono riportati sull'istogramma sottostante (Figura 4.21).

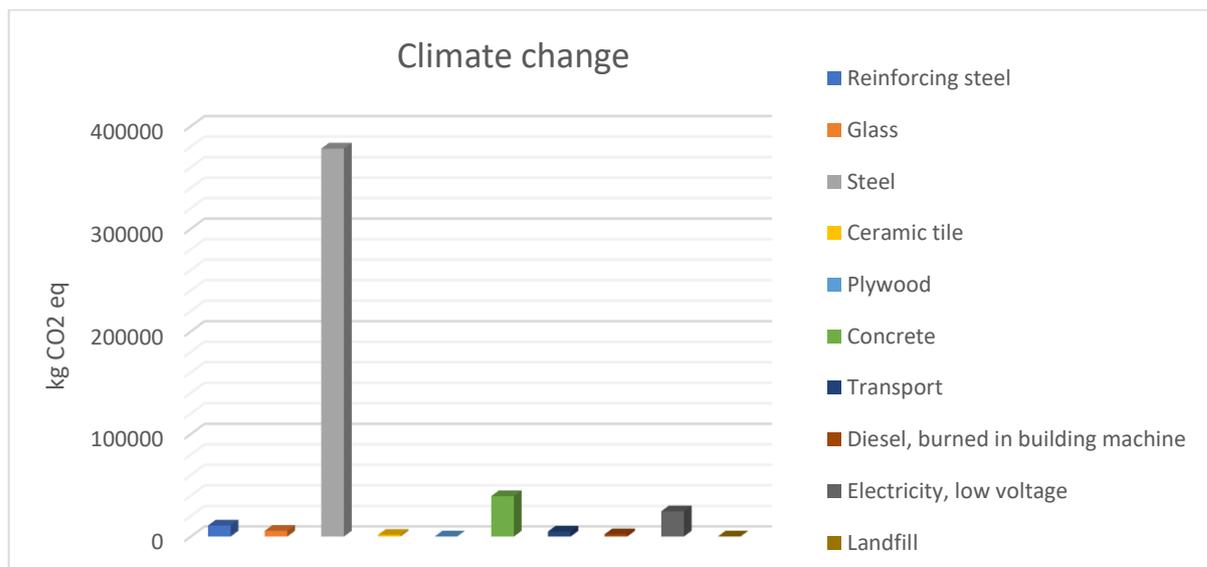


Figura 4.21: Climate change Scenario II Consequential

Ozone depletion

Per la riduzione dello strato di ozono, oltre all'acciaio, si può notare un picco per il consumo di elettricità. Ciò è dovuto al fabbisogno energetico delle macchine (*Figura 4.22*).

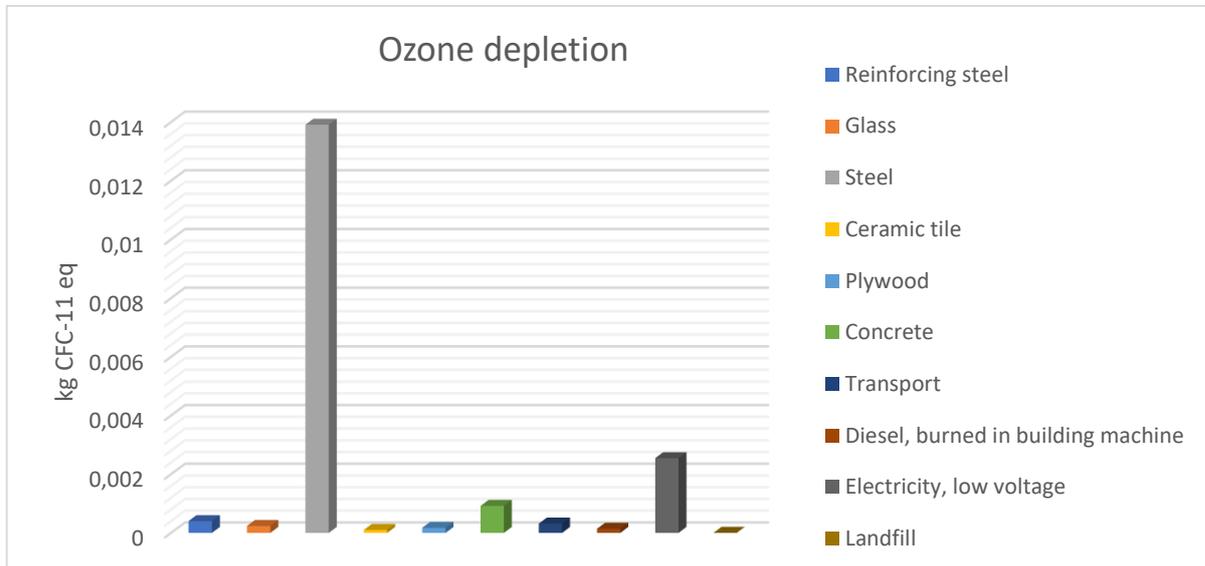


Figura 4.22: Ozone depletion Scenario II Consequential

Human health (cancer/ non cancer effects)

La terza categoria valutata è legata alla salute umana. Questa può condurre a cancro o ad altri effetti dannosi per l'organismo. Nelle *Figure 4.23* e *4.24* vengono mostrati gli impatti indotti dai vari materiali e operazioni.

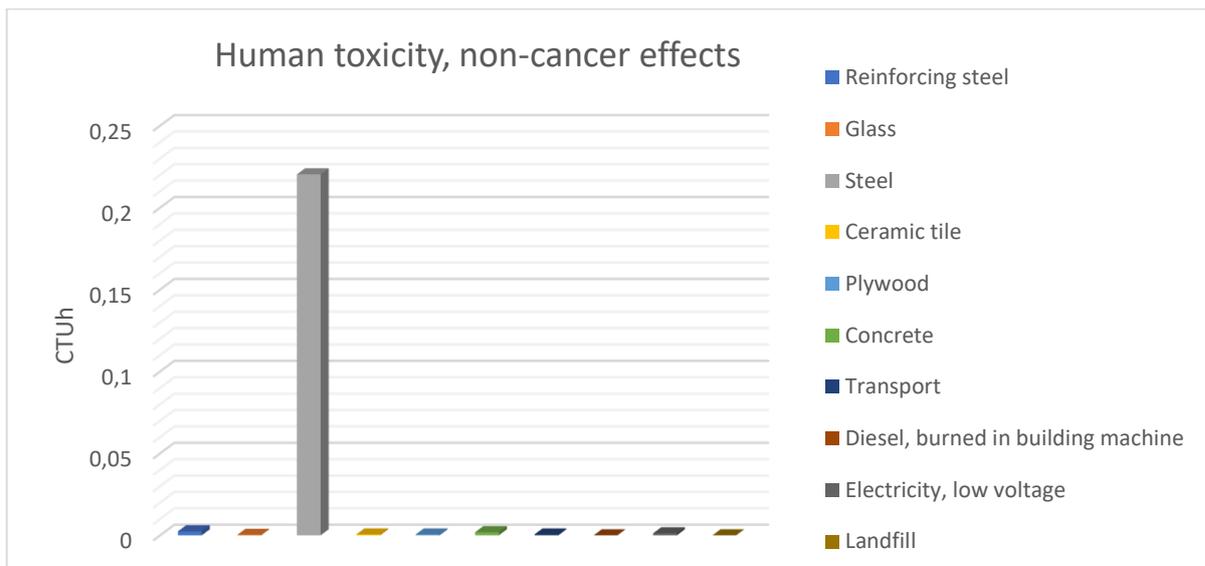


Figura 4.23: Human toxicity, non-cancer effects, Scenario II Consequential

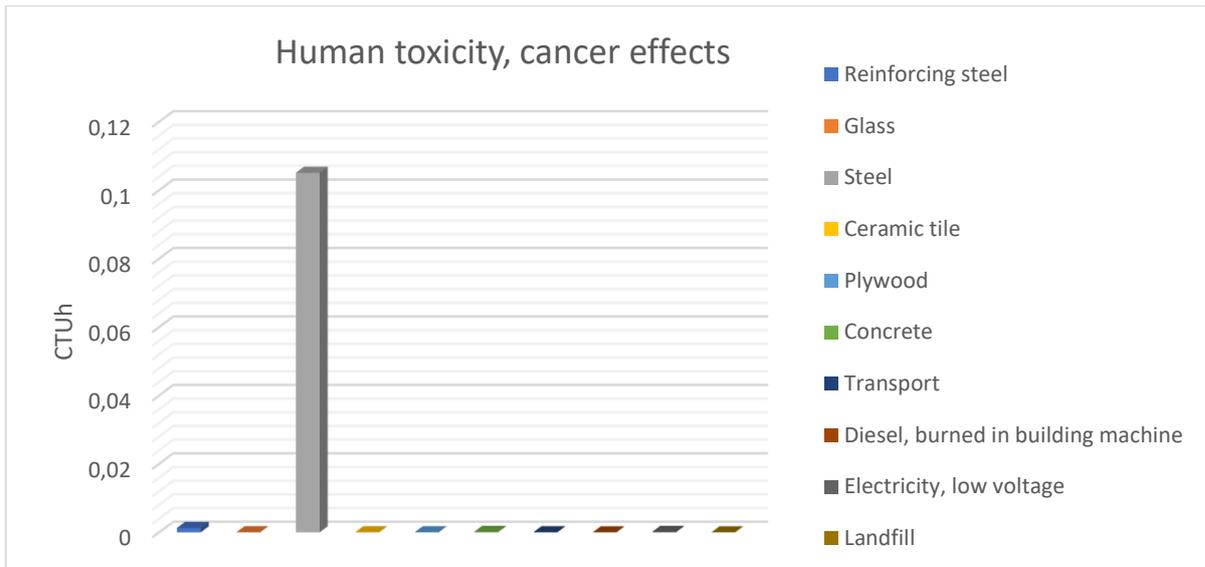


Figura 4.24: Human toxicity, cancer effects, Scenario II Consequential

Se, nello scenario I, l'acciaio ha avuto un impatto significativo sulla salute umana, per lo scenario II, dove questa quantità è considerevolmente più elevata, l'impatto associato è di due ordini di grandezza maggiore.

Particulate matter

L'inquinamento atmosferico provocato da aerosol primari e secondari nell'atmosfera può avere un impatto negativo importante sulla salute umana. La Figura 4.25 mostra il relativo impatto indotto dell'emissione di tali particelle nell'aria. L'unità di misura adottata è kg PM 2.5 eq.

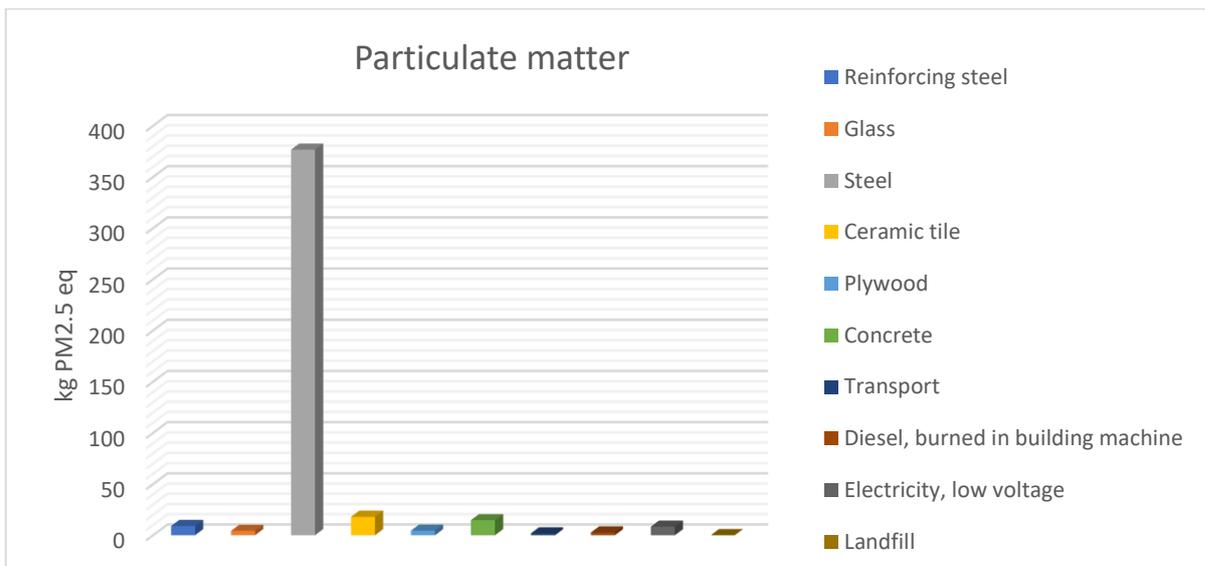


Figura 4.25: Particulate matter Scenario II Consequential

Freshwater eutrophication

L'eutrofizzazione è un tipo di inquinamento indotto dal deposito o dallo scarico di sostanze nel suolo (acque sotterranee) o corsi d'acqua. La *Figure 4.26* ne mostra il relativo impatto. L'unità di misura adottata è kg P eq (chilogrammi di fosforo equivalente). Vengono prodotti pochi detriti, quindi l'impatto indotto sulla discarica sarà quasi zero. Altrimenti sarà per l'acciaio di grande impatto.

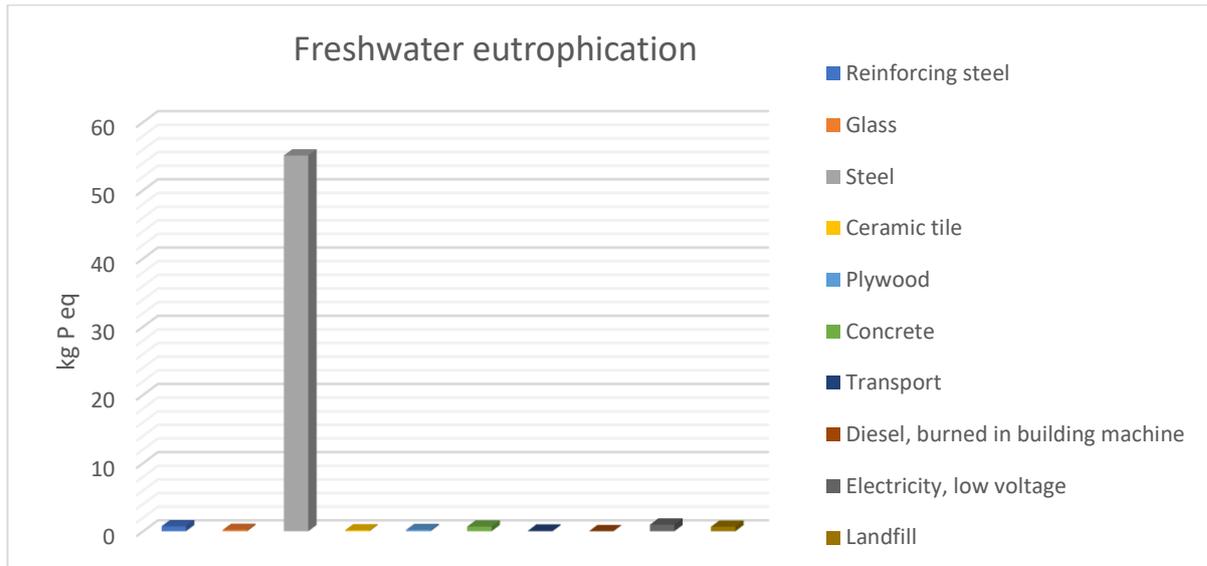


Figura 4.26: Freshwater eutrophication Scenario II Consequential

Land use

La seguente categoria d'impatto (*Figura 4.27*) valuta l'uso del suolo e il danno agli ecosistemi dovuto all'occupazione e/o alla trasformazione della terra.

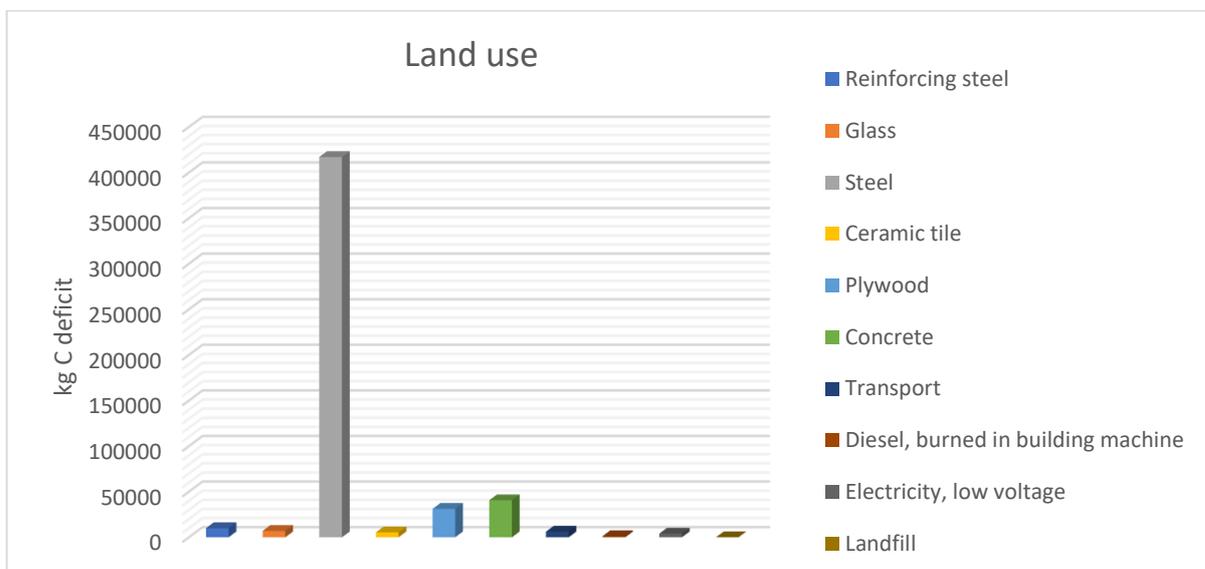


Figura 4.27: Land use Scenario II Consequential

Mineral, fossil, and energy resource depletion

L'ultima categoria valutata è legata alla riduzione delle materie prime e consumi energetici. Nella *Figura 4.28* vengono mostrati gli impatti indotti dall'utilizzo dei vari materiali e dal consumo di energia per le varie operazioni. L'unità di misura adottata è kg Sb eq (chilogrammi di antimonio equivalente).

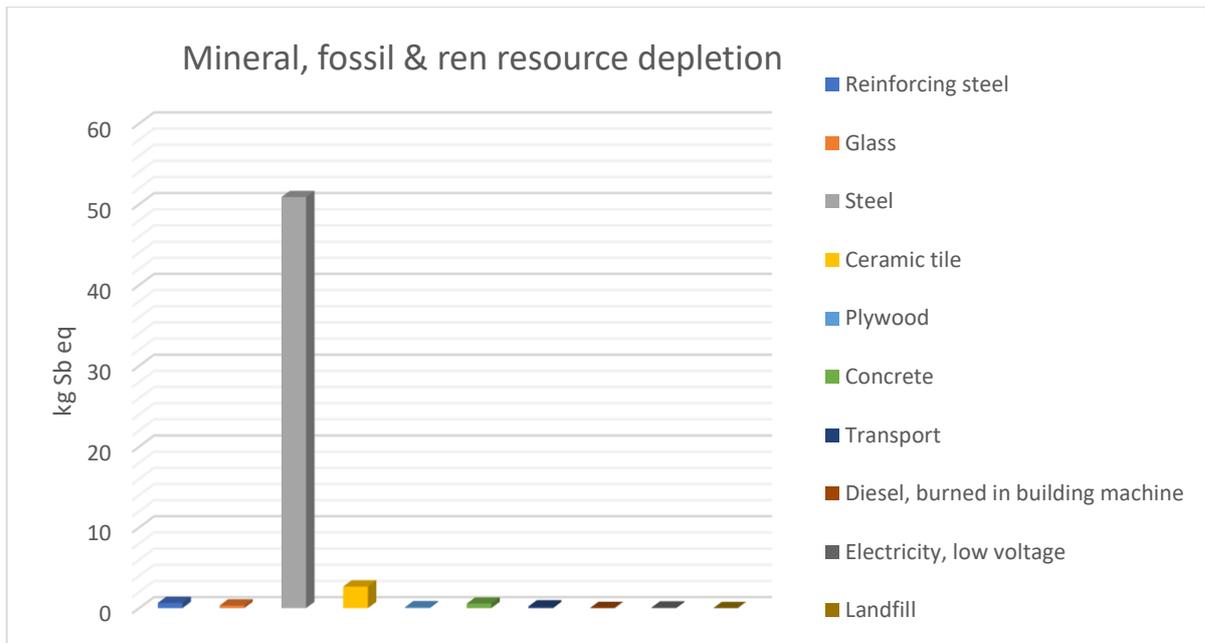


Figura 4.28: Mineral, fossil and energy resource depletion Scenario II Consequential

4.4 Confronto risultati

L'obiettivo ultimo della seguente analisi è quello di confrontare gli impatti associati ai 4 scenari considerati e per questi identificare quello meno dannoso per l'ambiente o salute umana. Nella *Tabella 4.7* vengono mostrati i carichi ambientali totali per ogni scenario e per ogni impatto.

Tabella 4.7: Confronto degli impatti dei quattro scenari per tutte le categorie analizzate

Impact category	Unit	SCENARIO I	SCENARIO I / CONSEQ	SCENARIO II	SCENARIO II / CONSEQ
Climate change	kg CO2 eq	1,26E+06	1,09E+06	4,61E+05	4,54E+05
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	7,26E-02	7,54E-02	1,76E-02	1,83E-02
Human toxicity, non-cancer effects	CTUh	9,25E-02	5,00E-02	2,29E-01	2,24E-01
Human toxicity, cancer effects	CTUh	2,43E-02	1,87E-03	1,08E-01	1,06E-01
Particulate matter	kg PM2.5 eq	1,49E+03	1,32E+03	4,44E+02	4,30E+02
Ionizing radiation HH	kBq U235 eq	4,87E+04	5,81E+04	1,19E+04	1,33E+04
Ionizing radiation E (interim)	CTUe	3,57E-01	4,27E-01	8,65E-02	9,74E-02
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	5,84E+03	4,65E+03	1,92E+03	1,85E+03
Acidification	molc H+ eq	6,61E+03	5,39E+03	2,74E+03	2,69E+03
Terrestrial eutrophication	molc N eq	1,98E+04	1,61E+04	5,61E+03	5,44E+03
Freshwater eutrophication	kg P eq	3,26E+02	7,87E+01	6,37E+01	5,93E+01
Marine eutrophication	kg N eq	1,78E+03	1,46E+03	4,89E+02	4,75E+02
Freshwater ecotoxicity	CTUe	5,69E+05	2,40E+05	1,30E+06	1,26E+06
Land use	kg C deficit	1,24E+06	5,44E+05	5,37E+05	5,08E+05
Water resource depletion	m3 water eq	7,72E+05	1,06E+06	5,59E+05	5,96E+05
Mineral, fossil & ren resource depletion	kg Sb eq	1,61E+02	1,26E+02	5,60E+01	5,01E+01

Nella tabella precedente vengono mostrati i risultati numerici dello studio LCA. Ogni categoria è caratterizzata dalla propria unità di misura e tramite il confronto dei valori numerici si può valutare per quell'impatto quale sia il più gravoso.

La rappresentazione grafica dei seguenti risultati viene mostrata nella *Figura 4.29*. In tale figura tutti i valori sono normalizzati. Per ogni categoria al valore caratterizzato dal massimo impatto viene attribuito il 100% del carico ambientale; gli altri valori saranno poi scalati in funzione di tale massimo.

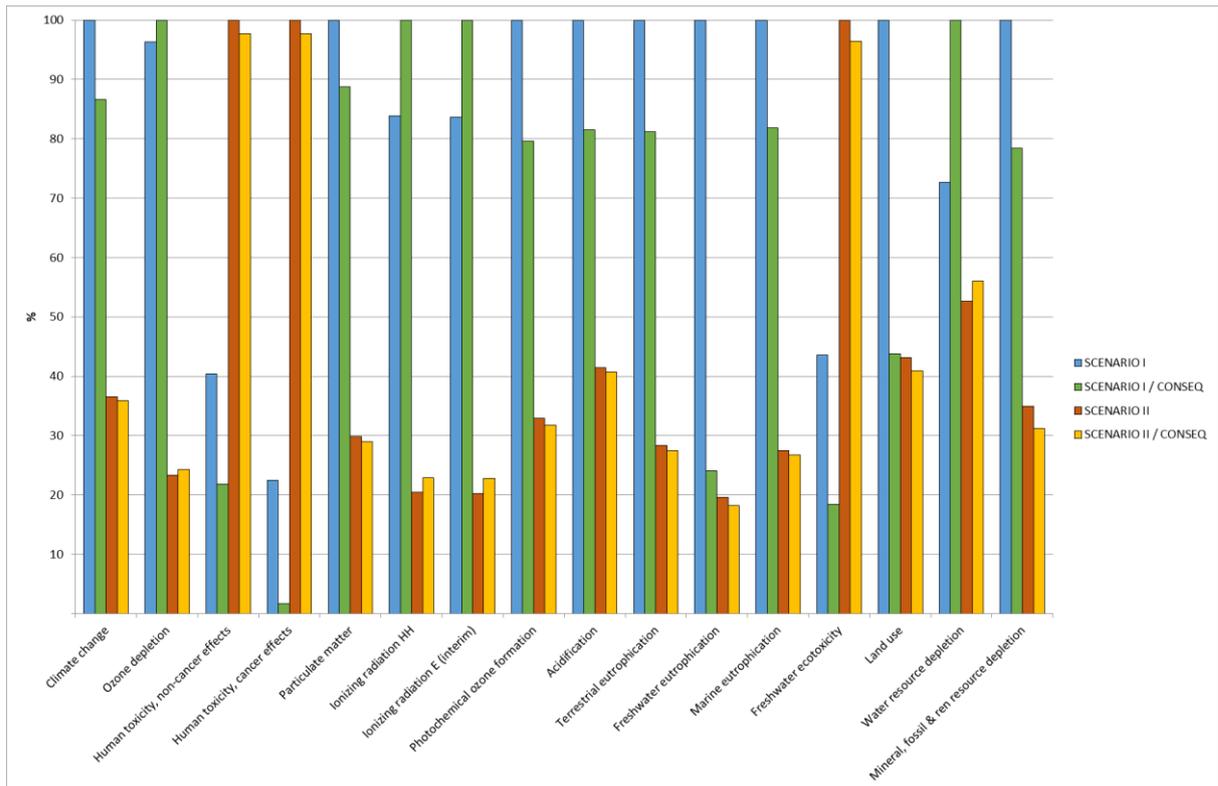


Figura 4.29: Confronto degli impatti dei quattro scenari per tutte le categorie analizzate

Nell'istogramma precedente viene rappresentato graficamente, per ogni categoria, il confronto tra gli scenari. Per tutte le categorie analizzate, quella alla quale oggi si pone maggiore attenzione è il cambiamento climatico.

Lo scenario I (demolizione e ricostruzione senza riciclo), come ci si aspettava, è caratterizzato dal massimo impatto, (100%). Le macerie prodotte sono importanti; queste se riciclate invece di essere dismesse in discarica porterà ad un vantaggio rilevante. L'abbassamento dei kg di CO₂ eq, passando dallo Scenario I allo Scenario I Consequential, è 14.52% (si ha una riduzione di 16890 kg di CO₂ eq). Il risultato ottenuto dimostra, per la realizzazione di una nuova struttura in seguito ad una demolizione, come l'applicazione della direttiva 2008/98/CE conduca ad una rimarchevole riduzione dei carichi ambientali.

Passando dallo Scenario I allo Scenario II si nota però come la riduzione dei kg di CO₂ eq sia considerevolmente maggiore dai due casi precedenti. La realizzazione di un esoscheletro esterno, in sostituzione alla demolizione totale della struttura, permette di abbattere tali emissioni; si passa da 1261963 kg di CO₂ eq dello Scenario I a 460601 kg di CO₂ eq dello Scenario II. L'operazione di restauro impatta circa un terzo di quella di ricostruzione. Gli scarti prodotti in questo secondo scenario sono pochi e il vantaggio che si otterrebbe riciclando queste le macerie è di conseguenza molto ridotto (solo lo 0.5%). Dall'analisi dei risultati si evince comunque come, in linea con le aspettative, il secondo scenario risulti più conforme ad uno "sviluppo sostenibile" dell'edilizia.

Per la riduzione della fascia di ozono gli andamenti sono invertiti: la condizione di riciclo, per la quale occorre consumare dell'energia, determina degli impatti maggiori rispetto all'abbandono in discarica. Dall'andamento globale si constata come lo Scenario II sia sempre il più favorevole.

Come già anticipato nel Capitolo 4.3 la produzione dell'acciaio emette delle sostanze tossiche dannose per la salute umana. È dunque lecito aspettarsi che lo Scenario II (0.229 CTUh non cancerogeno e 0.108 CTUh cancerogeno), caratterizzato da un significativo quantitativo di acciaio costituente l'esoscheletro, abbia un impatto notevolmente maggiore rispetto allo Scenario I (0.092 CTUh non cancerogeno e 0.024 CTUh cancerogeno). Nello Scenario I Consequential, nel quale si ha il riciclo totale dell'acciaio, l'impatto cancerogeno è pari all'1%. Nella eutrofizzazione dell'acqua l'impatto maggiore, quasi assoluto, era dato dall'abbandono del materiale in discarica. Lo Scenario I non ricicla nulla e deposita tutte le macerie in discarica; l'impatto associato è 326.1 kg P eq. Lo Scenario I Consequential riciclando riduce il seguente valore scendendo fino a 78.65 kg P eq. Tale scenario presenta valori molto simili allo Scenario II con e senza riciclo. La ridotta differenza è conseguente alla limitata produzione di macerie; queste sia che finiscano in discarica o che vengano riciclate non produrranno delle variazioni rilevanti.

Un andamento molto simile al caso precedente lo si registra per l'uso del suolo. L'impatto maggiore è dato dallo Scenario I (occupazione del suolo per le macerie in discarica). La ridotta variazione dei tre scenari successivi è indotta dal ridotto abbandono di tali rifiuti (Scenario I Consequential) e dalla ridotta produzione di macerie (Scenario II e Scenario II Consequential). L'ultima categoria valutata riguarda la riduzione delle materie prime e consumi energetici. Lo Scenario I predomina sugli altri scenari; ciò è conseguente alla richiesta di un elevato volume di nuovo materiale prodotto senza il riuso delle macerie (160.5 kg Sb eq). Nel caso di riciclo si ottiene una riduzione di consumo di materie prime del 21.57 % (125.9 Sb eq). La riduzione per lo Scenario II è del 65.09% (senza riciclo) e 68.78% (con riciclo). Benché il riciclo delle macerie non produca risultati rilevanti, il vantaggio maggiore è indotto da una minor richiesta di materiali per stabilizzare l'opera (l'unico materiale presente in grandi quantità è l'acciaio, materiali ceramici e mattoni non sono richiesti o necessari in piccole quantità).

Tutti i risultati ottenuti dimostrano come la soluzione proposta nel seguente lavoro di tesi di stabilizzare la struttura esistente con un involucro esterno sia la più sostenibile e la meno impattante. Nei capitoli successivi si è approfondita, nel dettaglio, risposta strutturale dell'edificio riqualificato.

Capitolo 5

L'uso dell'esoscheletro nell'adeguamento sismico

Come già discusso in precedenza, il patrimonio edilizio italiano risulta essere sempre più fragile e vulnerabile a causa degli eventi sismici. Inoltre, l'edilizia realizzata tra gli anni '50 e gli anni '80 presenta problematiche inerenti la sicurezza strutturale, legate ad una concezione di progettazione ormai superata ("trave forte e pilastro debole") ed all'impiego di materiali di scarsa qualità. Oggi, per mitigare i rischi di tali edifici e garantire la loro continua fruizione, possono essere adottate soluzioni progettuali basate sull'impiego di esoscheletri adattivi, che fungono da protesi per l'edificio, garantendo efficienza strutturale tanto in campo statico quanto in caso di azioni sismiche agenti. L'esoscheletro, struttura in acciaio autoportante esterna, permette di ottenere simultaneamente il *seismic upgrade*, il *retrofit* energetico, l'adeguamento impiantistico e il *remodelage* di tutti i manufatti residenziali vetusti e ad elevata vulnerabilità [48]. Si vuole compensare l'obsolescenza strutturale, estetica e funzionale tramite politiche di preservazione della vita umana, di sostenibilità ambientale ed uso razionale delle risorse economiche disponibili. Per tale motivo, l'obiettivo della seconda parte del seguente lavoro di tesi tratta la modellazione di una struttura esterna in acciaio che funga da supporto alla struttura esistente nei confronti delle azioni sismiche.

5.1 Soluzioni progettuali secondo normativa

Si è dimostrato, dal un punto di vista della sostenibilità, come la soluzione di demolizione e ricostruzione non sia la più vantaggiosa. Occorre dunque operare sul patrimonio esistente e trovare per questo delle soluzioni tali da consolidarlo oltre che per carichi verticali anche per azioni orizzontali (eventi sismici). Il tema degli interventi sulle costruzioni esistenti viene affrontato e regolamentato nel capitolo 8 della NTC 2018. Nel dettaglio, gli interventi di adeguamento di queste strutture possono essere raggruppati in tre categorie principali [28]:

- interventi locali o di riparazione: si tratta di interventi volti a migliorare le condizioni di singoli elementi strutturali non alterando le condizioni di sicurezza preesistenti;
- interventi di miglioramento: interventi atti ad aumentare la sicurezza strutturale preesistente, senza necessariamente raggiungere prefissati livelli di sicurezza;
- interventi di adeguamento: interventi attuati per aumentare la sicurezza strutturale preesistente ottenendo specifici livelli di sicurezza.

Di questi interventi solo quelli di miglioramento ed adeguamento sono poi sottoposti al collaudo statico.

Gli **interventi locali o di riparazione** sono quelli più rapidi e semplici e riguardano singole parti o elementi della struttura. Nel complesso, questi interventi non devono modificare il comportamento globale dell'edificio e sono volti a svolgere una o più finalità:

- ripristinare, rispetto alla condizione precedente al danno, le caratteristiche iniziali di elementi danneggiati;
- migliorare la resistenza e/o duttilità di parti danneggiate e non;
- impedire meccanismi di collasso locale;
- modificare una porzione limitata della struttura.

Occorre comunque valutare l'incremento del livello di sicurezza locale.

Per gli **interventi di miglioramento**, la valutazione della sicurezza dovrà essere estesa a tutte le parti della struttura interessate da modifiche del loro comportamento. La NTC 2018 prevede che il livello di sicurezza della costruzione sia quantificato mediante il parametro ζ_E che rappresenta il rapporto tra l'azione sismica massima sopportabile dalla struttura e l'azione sismica massima che si utilizzerebbe nel progetto di una nuova costruzione. Per il seguente coefficiente ζ_E sono previste delle limitazioni da dover rispettare a seguito di interventi di miglioramento sismico (in funzione del tipo di classe). In linea generale, il valore di ζ_E può anche essere minore all'unità; occorre però far sì che le costruzioni di classe II o III, in seguito ad interventi di miglioramento, abbiano un incrementato del valore di ζ_E non inferiore a 0.1 [28].

L' **intervento di adeguamento** diviene obbligatorio nel momento in cui si voglia:

- sopraelevare la costruzione;
- ampliare la costruzione esistente;
- apportare variazioni di destinazioni d'uso che determinino un incremento dei carichi globali verticali in fondazione superiori a 10%;
- effettuare interventi strutturali volti a trasformare la costruzione mediante un insieme di opere che conducano ad una modifica del sistema precedente;
- apportare modifiche che conducano dalla classe III (uso scolastico) alla classe IV.

Nel caso in cui l'intervento sia accompagnato da un adeguamento sismico il coefficiente ζ_E , dipendente dalla tipologia d'intervento, dovrà essere [28]:

- $\zeta_E \geq 1.0$ per la prima, seconda e quarta tipologia;
- $\zeta_E \geq 0.8$ per la terza e quinta tipologia.

Occorre comunque effettuare la verifica delle singole parti della struttura anche se sono interessate alla modifica solo piccole porzioni della struttura.

Tramite la valutazione del parametro ζ_E risulta possibile classificare il rischio sismico e tramite la sua variazione si può valutare se l'intervento adottato ha sortito l'effetto desiderato nella stabilizzazione della struttura nei confronti delle azioni sismiche.

5.2 Aspetti normativi

Per l'edificio oggetto dello studio si è percorsa la strada dell'adeguamento sismico e pertanto è stato necessario definire le azioni sismiche di progetto. La norma tecnica delle costruzioni NTC 2018 rappresenta la regolamentazione tramite la quale considerare tali azioni (Capitolo 7). Le azioni di progetto si definiscono a partire dalla "pericolosità sismica di base" del sito ed è espressa in funzione delle caratteristiche morfologiche e stratigrafiche che andranno a definire la risposta sismica locale [28].

Per l'esecuzione dell'analisi devono essere rispettati gli stati limite d'esercizio ed ultimi che comprendano non soltanto gli elementi strutturali, ma anche quelli non strutturali e gli impianti. Vengono definiti come Stati Limite di Esercizio (SLE) lo Stato Limite di Operatività (SLO) e lo Stato Limite di Danno (SLD); vengono identificati invece come Stati Limite Ultimi (SLU) lo Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV) e lo Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC). Nel dettaglio, lo SLO impone che in seguito ad un terremoto la costruzione nel suo complesso non subisca danni e interruzioni d'uso; lo SLE stabilisce che a seguito del terremoto la costruzione possa subire dei danneggiamenti, ma devono essere tali da non mettere a rischio gli utenti e la capacità di resistenza e la rigidità nei confronti delle azioni verticali e orizzontali. Per gli SLU i danni associati sono maggiori. Nello SLV i crolli sono più importanti ma si ha ancora una certa capacità nel resistere al collasso per azioni orizzontali; infine, lo SLC rappresenta lo scenario peggiore con ingenti danni e rotture; inoltre, mentre si ha ancora una certa resistenza per le azioni verticali, la resistenza per quelle orizzontali è minima.

Per ognuno di questi Stati Limite si associa una certa probabilità di superamento del periodo di riferimento P_{V_R} a partire dalla quale si può determinare l'azione sismica di riferimento (Tabella 5.1).

Tabella 5.1: Tabella probabilità di superamento del periodo di riferimento per i vari stati limite [28]

Stati limite	P_{V_R} probabilità di superamento nel periodo di riferimento V_R	
Stati limite di esercizio	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

Con V_R si intende il periodo di riferimento dell'azione sismica ricavabile per ciascuna tipologia di costruzione ed è ottenuto moltiplicando la sua vita nominale di progetto V_N per il coefficiente d'uso C_U [28]:

$$V_R = V_N \cdot C_U \quad (2)$$

La vita nominale V_N (intervallo temporale in cui è previsto che l'opera mantenga specifici livelli prestazionali) per un edificio ordinario è di 50 anni. La classe d'uso C_U si riferisce al grado di affollamento presente nella struttura in funzione del suo utilizzo.

Il secondo passaggio previsto dalla normativa è la caratterizzazione del sottosuolo. È possibile impiegare un metodo semplificato che consiste nell'identificazione della categoria in funzione della velocità di propagazione delle onde di taglio nel terreno. Per poter valutare l'azione sismica occorre quindi conoscere la tipologia di terreno sul quale poggia l'opera. La normativa prevede 5 classi di suddivisione litologiche (dalla A alla E). Sempre in riferimento al terreno occorre valutare anche la classe topografica. Come per le categorie del sottosuolo, anche per le categorie topografiche la normativa propone una classificazione semplificata (da T1 a T4). Il moto sismico è costituito da componenti traslazioni indipendenti tra loro che agiscono con direzione orizzontale, X e Y, e verticale Z. Queste sono rappresentabili come l'accelerazione massima al suolo, con l'accelerazione massima in superficie associata al relativo spettro di risposta oppure con un accelerogramma. Si impiega un solo spettro di risposta per le direzioni orizzontali e le due componenti di accelerazione, mentre la direzione verticale ha un proprio spettro ed una specifica componente accelerometrica.

La combinazione delle azioni fornita dalla norma per azioni sismiche viene così definita [28]:

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} Q_{k1} + \psi_{22} Q_{k2} + \dots \quad (3)$$

con E si indicano le sollecitazioni del sisma, G_j sono le azioni permanenti che agiscono durante tutta la vita nominale di una struttura, P individua l'eventuale precompressione; infine, con Q_j si intendono le azioni variabili di breve o lunga durata che sono moltiplicate per dei coefficienti correttivi ψ_{ij} che ne riducono l'entità, poiché la probabilità che queste sollecitazioni agiscano tutte insieme alla massima intensità è molto bassa.

Per quanto riguarda l'analisi dinamica lineare, gli effetti che le azioni sismiche E_i hanno sull'edificio sono combinate secondo a seguente relazione [28]:

$$1.00 \cdot E_x + 0.30 \cdot E_y + 0.30 \cdot E_z \quad (4)$$

Nella precedente espressione si alternano i coefficienti moltiplicativi al fine di identificare la combinazione più gravosa per l'edificio.

Occorre identificare anche il metodo con cui effettuare l'analisi: lineare o non lineare. La scelta dipende dalle caratteristiche della struttura e del modello di comportamento adottato.

L'analisi lineare può essere utilizzata per calcolare la domanda sismica nel caso di comportamento strutturale sia non dissipativo che dissipativo. L'analisi non lineare, così come l'analisi lineare, può essere utilizzata sia per sistemi strutturali a comportamento non dissipativo che per sistemi strutturali a comportamento dissipativo; per di più, questa tiene

conto delle non linearità geometriche e del materiale. In aggiunta al fatto che l'analisi sia lineare o non lineare, i metodi sono articolati anche in funzione del modo in cui viene trattato l'equilibrio: dinamicamente o staticamente.

Sia per analisi lineare dinamica, sia per analisi lineare statica, si deve tenere conto dell'eccentricità accidentale del centro di massa. L'**analisi lineare dinamica** consiste:

- nella determinazione dei modi di vibrare della costruzione (analisi modale);
- nel calcolo degli effetti dell'azione sismica, rappresentata dallo spettro di risposta di progetto, per ciascuno dei modi di vibrare individuati;
- nella combinazione di questi effetti.

L'**analisi lineare statica** consiste invece nell'applicazione di forze statiche equivalenti alle forze d'inerzia indotte dall'azione sismica e può essere effettuata per costruzioni che rispettino dei determinati requisiti.

L'**analisi non lineare dinamica** consiste nel calcolo della risposta sismica della struttura mediante integrazione delle equazioni del moto, utilizzando un modello non lineare della struttura e le storie temporali del moto del terreno. Essa ha lo scopo di valutare il comportamento dinamico della struttura in campo non lineare, consentendo il confronto tra duttilità richiesta e duttilità disponibile allo SLC e le relative verifiche, nonché di verificare l'integrità degli elementi strutturali nei confronti di possibili comportamenti fragili. L'analisi non lineare dinamica deve essere comunque confrontata con un'analisi modale con spettro di risposta di progetto, al fine di verificare le differenze in termini di sollecitazioni globali alla base della struttura.

L'**analisi non lineare statica** richiede che al sistema strutturale reale sia associato un sistema strutturale equivalente non lineare. Si devono considerare almeno due distribuzioni di forze d'inerzia.

Se la struttura non è dissipativa si utilizza uno spettro di progetto caratterizzato da un fattore di struttura q unitario [28]; si tratta di un parametro riduttivo che permette di descrivere gli spettri a partire da quelli di risposta elastici, ovvero i diagrammi che mostrano la variazione temporale delle accelerazioni o degli spostamenti. La relazione che li lega è [28]:

$$S_d(T) = S_e(T)/q \quad (5)$$

dove i pedici d ed e indicano rispettivamente la condizione di progetto e quella elastica.

Per mezzo del fattore di struttura q si progetta con uno spettro in cui le forze sismiche sono ridotte rispetto a quelle di normativa e permettono di assicurare una capacità plastica al sistema che prima non era garantita.

Un aspetto importante da valutare quando si parla di analisi sismica è anche la possibilità che la struttura subisca spostamenti d'interpiano tali da causare la sua inagibilità temporanea.

Per ovviare a tale problema, nel caso di un'analisi dinamica in condizioni sismiche allo stato limite di danno SLD, la norma prescrive che essi siano inferiori ad un valore soglia definito mediante la seguente relazione (per tamponature collegate rigidamente alla struttura) [28]:

$$qd_r \leq 0.0050 \cdot h \quad (6)$$

Dove d_r è il *drift* d'interpiano, cioè la differenza tra lo spostamento di un piano e quello del solaio sottostante, e h è l'altezza del piano.

Lo studio della struttura in esame è stato effettuato mediante un'Analisi Dinamica Modale in campo elastico lineare a partire dalla quale si sono ricavate le relative forme modali, le deformate in condizioni sismiche e le sollecitazioni di taglio agenti. I risultati di tale analisi sono ottenuti per mezzo del software di calcolo Robot.

5.3 Azione sismica

L'area del Mediterraneo è una zona soggetta a forte sismicità. Ogni anno si verificano uno o più terremoti intensi che causano distruzione oltre ad un elevato numero di vittime. Ognuno di questi eventi sismici dimostra come il patrimonio edilizio europeo esistente non sia adeguato da un punto di vista sismico e necessita di misure di sicurezza severe.

Di conseguenza, occorre effettuare un'analisi dei pericoli sismici. Questa è il primo passo nella valutazione del rischio sismico, ottenuta combinando il pericolo sismico con le condizioni del suolo locale e con i fattori di vulnerabilità dell'edificio (tipo, resistenza strutturale, età, densità di popolazione, uso del suolo). Frequenti terremoti di grandi dimensioni in aree remote comportano un'elevata pericolosità ma presentano bassi rischi; al contrario, i terremoti moderati in aree densamente popolate comportano un rischio maggiore.

Nella *Figura 5.1* viene mostrata la mappa dei pericoli sismici dell'area europea, mostrando la *Peak Ground Acceleration* (PGA) con una probabilità del 10% di superamento in 50 anni per una determinata condizione del suolo. I colori della mappa corrispondono al livello effettivo del pericolo: i colori più freddi rappresentano un rischio inferiore mentre i colori più caldi sono associati a un pericolo maggiore.

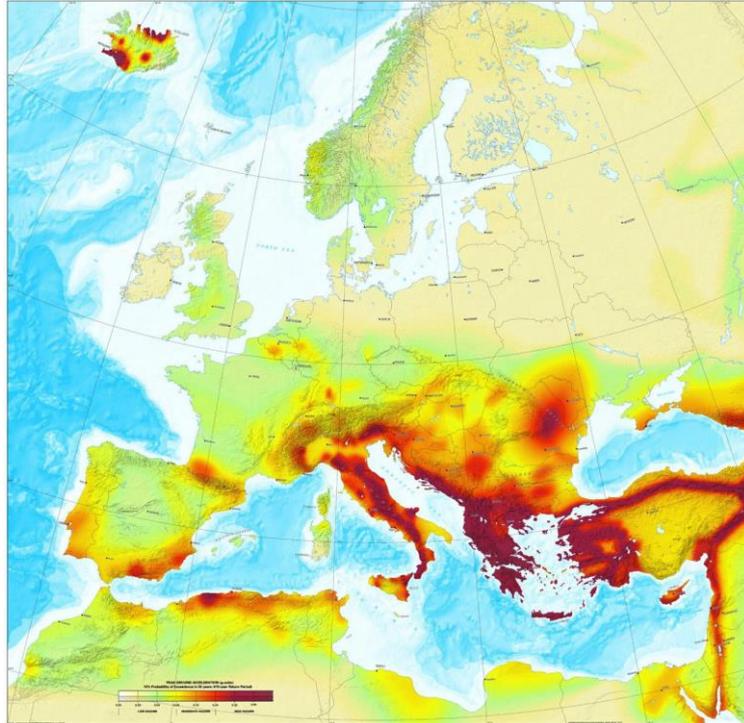


Figura 5.1: Mappa europea della pericolosità sismica [9]

La valutazione della vulnerabilità sismica del patrimonio edilizio può essere effettuata con diversi livelli di precisione. Si possono analizzare gli effetti dei terremoti su interi distretti colpiti (analisi di primo livello), oppure si può valutare accuratamente l'effetto sul singolo edificio (analisi di secondo livello).

La posizione di un edificio rispetto alle costruzioni vicine può inoltre influenzare in modo significativo il suo comportamento durante un terremoto e il suo livello di danno dopo l'evento sismico. La vicinanza di due edifici alti, con periodi naturali diversi, durante un terremoto possono oscillare a frequenze diverse e schiantarsi l'uno contro l'altro, provocando un effetto martellante. Tale danno non è una misura della forza del terremoto, ma un indicatore della mancanza di giunti strutturali tra gli edifici.

Occorre prima di tutto identificare alcune caratteristiche degli edifici che possono influenzarne il comportamento sismico. L'informazione di base più importante riguarda la tipologia strutturale dell'edificio (muratura, cemento armato, acciaio o legno). Altre caratteristiche importanti sono la regolarità sia in elevazione che in pianta, il numero dei piani, la connessione alle pareti perimetrali negli edifici in muratura, l'esistenza di possibili caratteristiche di resistenza al terremoto, ecc. La scala macro-sismica europea (EMS98) [9] classifica gli edifici attraverso una *Building Typology Matrix* (BTM) e per ogni tipo di struttura fornisce una classe di vulnerabilità. Fondamentalmente vengono definite sei classi di vulnerabilità decrescente (dalla A alla F): le classi A, B e C sono per edifici ordinari progettati senza controllo esplicito della resistenza sismica; le classi D, E ed F sono invece per edifici con livelli di protezione progressivamente crescente (Figura 5.2).

Type of Structure	Vulnerability Class					
	A	B	C	D	E	F
MASONRY	○					
	○	—				
	○	—				
	○	—	—			
	○	—	—	—		
	○	—	—	—	—	
	○	—	—	—	—	—
REINFORCED CONCRETE (RC)	○	—	—			
	○	—	—	—		
	○	—	—	—	—	
	○	—	—	—	—	
	○	—	—	—	—	—
	○	—	—	—	—	—
STEEL			○	—	—	
WOOD			○	—	—	

○ most likely vulnerability class; — probable range;
 range of less probable, exceptional cases

Figura 5.2: Classi di vulnerabilità sismica [9]

Nel seguente contesto di adeguamento sismico e di aumento della classe di vulnerabilità si inseriscono alcuni provvedimenti emanati dal governo italiano atti ad incentivare tali operazioni. Questi incentivi, contenuti nella legge di bilancio del 2019, consentono agevolazioni fiscali per le ristrutturazioni e possono essere così suddivisi:

- *bonus ristrutturazione*: agevolazione del 50% su una spesa minima di 96 mila euro. Rientrano in questa operazione lavori di abbattimento delle barriere architettoniche, aumento della sicurezza e sostituzione degli infissi;
- *ecobonus*: detrazione fiscale del 65% per lavori di coibentazione termica degli edifici ed installazione di pannelli solari per migliorare la prestazione energetica;
- *sismabonus*: si applica per gli edifici situati in zona 1, 2 e 3; lo sconto dell'Irpef è del 70% se i lavori portano ad un miglioramento di una classe sismica, del 75% se invece le classi guadagnate sono 2. Tali percentuali sono aumentate di 10 punti se gli interventi riguardano anche le parti comuni degli edifici;
- *bonus facciate*: mentre i tre bonus precedenti erano già presenti nelle manovre degli anni precedenti, la novità del 2019 è il bonus che permette una detrazione fiscale fino al 90% per lavori di manutenzione e rifacimento delle facciate.

I benefici fiscali operati dallo Stato che si possono ottenere sono molteplici e rendono l'operazione di restauro ancora più vantaggiosa oltre che economica. L'esoscheletro adattivo, sviluppato nel seguente lavoro di tesi, è strutturato in maniera tale da rientrare in tutte le classi di bonus segnalate precedentemente.

5.4 Potenzialità del sistema esoscheletro

La soluzione proposta per l'adeguamento dell'edificio è quella di un esoscheletro esterno che supporta la struttura, permettendo di rinforzarla e al contempo di migliorarne l'efficienza termica ed energetica. Una struttura di questo tipo può anche essere modulabile in relazione al contesto geografico (susceptibilità sismica), climatico ed urbanistico.

L'esoscheletro è strutturato come una "gabbia" esterna all'edificio che lo avvolge con la funzione principale di colmare i deficit della struttura esistente (Figura 5.3).



Figura 5.3: Vantaggi derivanti dalla riqualificazione [8]

I vantaggi introdotti da questa soluzione sono molteplici:

- da un punto di vista strutturale offre un miglioramento sismico e statico. Alcune strutture spesso non soddisfano i requisiti minimi di resistenza dei confronti di carichi verticali e orizzontali (NTC 2018); inoltre hanno già raggiunto e superato il loro limite di vita utile di 50 anni;
- da un punto di vista energetico permette di aumentare l'efficienza energetica con una maggiore sostenibilità ambientale (involucri non ben coibentati con significativi ponti termici); si vuole ottenere una migliore qualità di vita;
- da un punto di vista formale riqualifica esteticamente la struttura e ne migliorare il relativo contesto urbano nel quale questa è inserita (strutture spesso prive di pregi architettonici).

L'esoscheletro è concepito per potersi adattare ad eventuali cambiamenti formali o tecnici. Sono preferibili, per l'esecuzione delle operazioni di costruzione, soluzioni a secco con materiali ecosostenibili.

Uno dei principali vantaggi è rappresentato dalla non necessità di ricollocazione degli inquilini durante le fasi di costruzione. L'operazione proposta è infatti poco invasiva per la struttura esistente e permette di operare senza alterarne l'abitabilità interna (possono comunque essere eseguiti degli interventi di riqualificazione interna a discrezione degli occupanti). Contrariamente alle operazioni di demolizione e ricostruzione, le cui tempistiche sono abbastanza lunghe (anni), le operazioni di riqualificazione sono molto più rapide da eseguire (pochi mesi).

L'obiettivo consiste nel realizzare una struttura esterna che assolva al compito di adeguamento statico e sismico assorbendo le varie azioni agenti ed evitando che queste vadano a gravare sull'edificio esistente o sulle fondazioni. Grazie al miglioramento statico della struttura risulta possibile anche aumentare la volumetria sopraelevando in sommità al palazzo.

Nella figura seguente (*Figura 5.4*) vengono mostrati i vantaggi derivanti dalla riqualificazione energetica e strutturale con esoscheletro rispetto alla demolizione e ricostruzione.

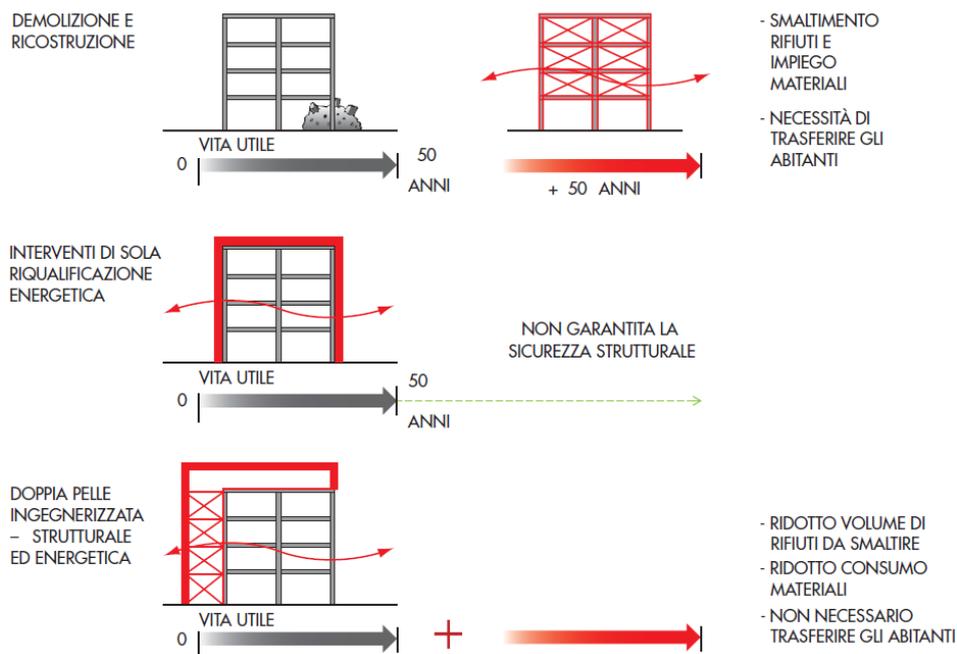


Figura 5.4: Soluzioni per un edificio esistente [8]

L'esoscheletro adattivo, in grado di adeguarsi all'ambiente, prende spunto dalla struttura esterna di alcuni invertebrati ed agisce come un dispositivo che interviene sull'elemento ammalorato ripristinandone e implementandone le caratteristiche [48]. Applicato agli edifici questo si traduce in una struttura indipendente poggiante su fondazioni autonome, ma collegata all'esistente per mezzo di connessioni (rigide o di altra natura).

L'operazione consiste nel consolidamento della struttura con un rinforzo puntuale dei nodi del telaio, delle travi e dei pilastri (mediante placcaggio ed incamiciatura). Da un punto di vista più ampio, il manufatto viene rinforzato tramite l'affiancamento di elementi sismo-

resistenti ed è in tal senso si inserisce l'esoscheletro. La struttura può essere concepita con due soluzioni differenti: o tramite l'adozione di controventi integrati all'interno dell'esoscheletro (soluzione a pareti), o, in modo innovativo, tramite una progettazione del nuovo involucro come sistema scatolare sismo-resistente (soluzione a guscio). La scelta della soluzione da impiegare dipende dalla rigidità iniziale dell'edificio. La soluzione scatolare permette di contenere maggiormente le sollecitazioni negli elementi, riducendone quindi lo spessore. Lo scopo dell'*adaptive reuse* di un manufatto è di elaborare interventi finalizzati ad azzerare la vulnerabilità strutturale dovuta ad azioni sismiche.

Le tipologie di rinforzo degli edifici sono molteplici; quelle analizzate, poiché adottate nell'esoscheletro, sono quelle a *diagrid* e a *tapered braces tubes*.

5.4.1 Tipologia a Tapered Braces Tubes

Il sistema a tubi rinforzati è molto efficiente per strutture alte, in quanto trasporta i carichi laterali tramite azioni assiali fino agli elementi tubolari perimetrali. Il primo edificio dotato di questo sistema è il John Hancock Center di Chicago (*Figura 5.5*) realizzato alla fine degli anni '60. Gli elementi strutturali vengono trasportati in facciata (in alcuni casi visibili, in altri casi nascosti all'interno della facciata stessa).



Figura 5.5: Veduta del John Hancock Center [49]

Il sistema di tubi rinforzati perimetrale è progettato in maniera tale da sopportare tutti i carichi laterali, mentre il nucleo serve ad assorbire i solo carichi gravitazionali. Le dimensioni degli elementi rinforzati sono determinate utilizzando la metodologia di progettazione basata sulla rigidità sviluppata da Moon: occorre soddisfare il requisito di spostamento laterale massimo, il quale deve essere minore di un cinquecentesimo dell'altezza dell'edificio [50]. La struttura è modellata come una trave a sbalzo e suddivisa longitudinalmente in moduli ripetitivi. Ogni modulo è caratterizzato da un singolo livello di diagonali. La *Figura 5.6* illustra un modulo a 10 piani in cui V è la forza di taglio laterale e M è il momento.

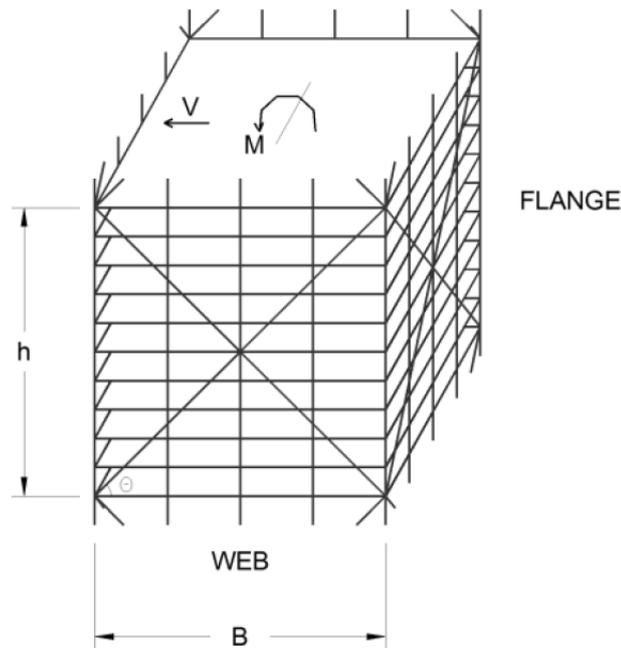


Figura 5.6: Schema a tubi rinforzati [50]

La rigidità laterale dei moduli può essere espressa come mostrato nelle equazioni 7 e 8 [50]:

$$K_T = \frac{4A_d E \cos^2 \theta \sin \theta}{h} \quad (7)$$

$$K_B = (N_{c,f} + \delta) \frac{B^2 A_c E}{2h} \quad (8)$$

K_T è rigidità al taglio; K_B rigidità alla flessione; A_d è l'area trasversale di ciascuna diagonale; A_c è area della sezione trasversale di ogni colonna; E è il modulo di elasticità dell'acciaio; θ è l'angolo dell'elemento diagonale; $N_{c,f}$ è il numero di colonne su ciascun telaio della flangia; δ è il contributo delle colonne per la rigidità della flessione; B è la larghezza dell'edificio nella direzione della forza applicata; h è l'altezza del modulo.

La rigidità a taglio del sistema è regolata principalmente dalla sezione trasversale della diagonale e dall'angolo dei controventi. La rigidezza alla flessione è invece regolata dalle dimensioni delle colonne perimetrali e dalla larghezza dell'edificio.

5.4.2 Tipologia a Diagrid

Una prima applicazione di questa tipologia strutturale si può trovare su grattacieli quali il Swiss Re Building realizzato a Londra nel 2004 o la Hearst Tower realizzata a New York nel 2006 (Figura 5.7), entrambi progettati da Norman Foster.

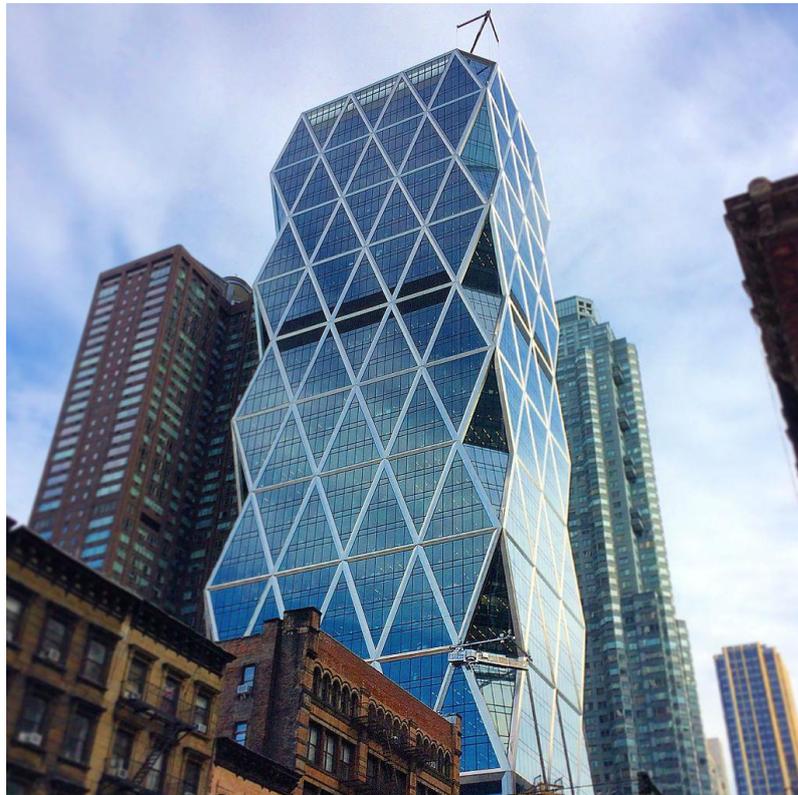


Figura 5.7: Veduta del Swiss Re Building [51]

Le strutture a *diagrid* permettono di trasportare i carichi laterali in maniera molto efficiente per mezzo degli elementi della griglia diagonale perimetrale. Il suo impiego su edifici alti ed affusolati permette di aumentarne ulteriormente la rigidità laterale. Le prestazioni strutturali del *diagrid* sono simili a quello di tubi controventati. Tuttavia, a differenza delle strutture tubolari rinforzate, composte da colonne verticali e da elementi di rinforzo diagonali, il *diagrid* è composto solamente da elementi diagonali e travi. In tale tipologia strutturale vengono dunque eliminate le colonne perimetrali.

Il primo parametro strutturale da identificare è l'angolo di inclinazione di questi elementi diagonali. Esso deve essere definito in maniera tale da poter sopportare efficientemente i momenti ribaltamenti e le forze di taglio. Rispetto all'orizzontale, l'angolo migliore per la

flessione e la gravità è 90 gradi, mentre quello per il taglio laterale è di circa 35 gradi [50]; l'angolo ottimale deve quindi essere compreso tra questi due valori. L'inclinazione delle diagonali sarà più elevata se l'edificio è snello, sarà invece più piccola se l'edificio è tozzo. L'angolo viene definito in base all'altezza e alle proporzioni dell'edificio. Inoltre, contrariamente alla tipologia del John Hancock Center, in cui ogni modulo ha un solo diamante, nella tipologia a *diagrid*, su ogni di essi ne sono presenti molteplici (Figura 5.8).

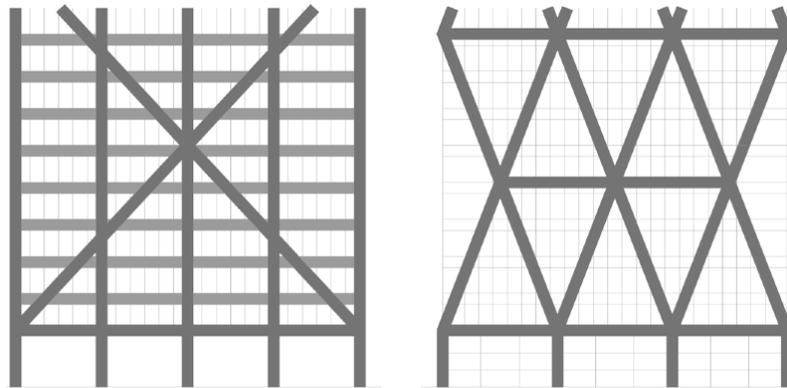


Figura 5.8: Confronto tra schema a tubi rinforzati e diagrid [52]

Così come nel caso precedente di elementi rinforzati, le dimensioni delle diagonali sono determinate utilizzando la metodologia di progettazione basata sulla rigidità di Moon: lo spostamento laterale massimo deve essere minore di un cinquecentesimo dell'altezza dell'edificio [50]. La struttura è modellata nella medesima maniera di una trave a sbalzo e suddivisa longitudinalmente in moduli ripetitivi. Ogni modulo è caratterizzato da più livelli di diagonali che si estendono su più piani. La Figura 5.9 illustra un modulo a 10 piani in cui V è la forza di taglio laterale e M è il momento.

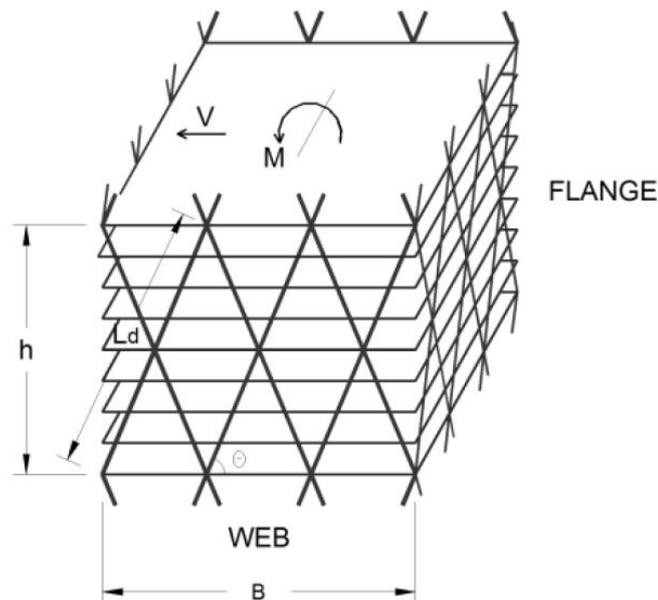


Figura 5.9: Schema a diagrid [50]

La rigidità laterale dei moduli può essere espressa come mostrato nelle equazioni 9 e 10 [50]:

$$K_T = 2N_{d,w} \frac{A_{d,w}E}{L_d} \cos^2 \theta \quad (9)$$

$$K_B = N_{d,f} \frac{B^2 A_{d,f}E}{2L_d} \sin^2 \theta \quad (10)$$

K_T è rigidità al taglio; K_B rigidità alla flessione; $A_{d,w}$ è l'area della sezione trasversale di ciascuna diagonale sui piani web; $A_{d,f}$ è l'area della sezione trasversale di ciascuna diagonale sui piani della flangia; E è il modulo di elasticità dell'acciaio; θ è l'angolo dell'elemento diagonale; B è la larghezza; L_d è la lunghezza della diagonale; $N_{d,w}$ è il numero di diagonaloni su ogni piano web; $N_{d,f}$ è il numero di diagonaloni su ciascun piano della flangia.

5.4.3 Tipologia di esoscheletro adottata

Sono state presentate, nei due sotto capitoli precedenti, due delle molteplici modalità per stabilizzare un edificio. La tipologia strutturale adottata per il palazzo oggetto del seguente studio è determinata dalla fusione delle due tipologie mostrate precedentemente. La struttura esterna sul lato lungo è caratterizzata da un sistema di travi rinforzate addossate a ciascuno dei pilastri costituenti l'edificio (*tapered braces tubes*) con travi diagonali che vanno a costituire non uno, ma 3 diamanti (*diagrid*) (Figura 5.10).

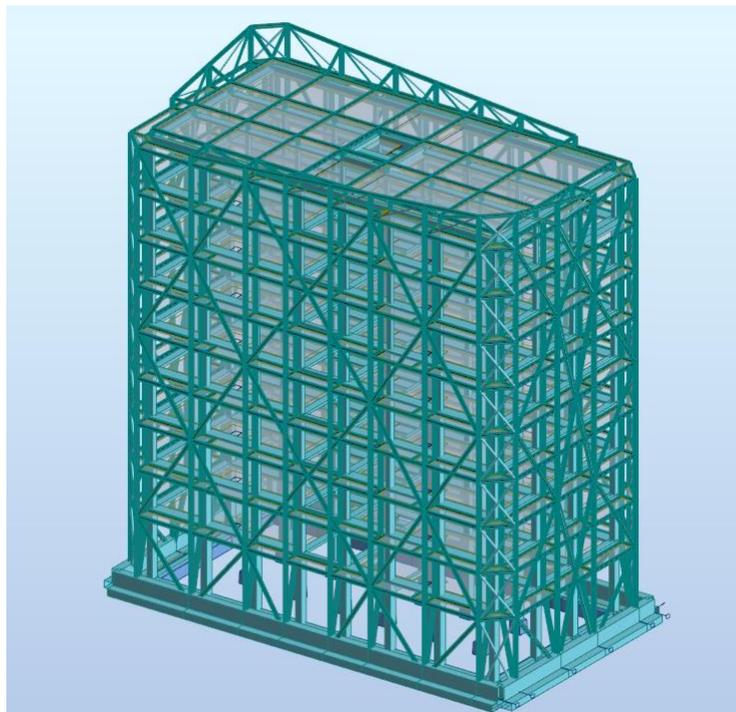


Figura 5.10: Rappresentazione grafica dell'edificio riqualificato con esoscheletro

Avendo i pilastri un distanziamento non costante, i punti di incontro delle diagonali non sono tra loro equi distanziati rispetto all'orizzontale; per effetto di ciò si ha un angolo di inclinazione della diagonale θ non costante ma variabile da diamante a diamante (Figura 5.11). La condizione migliore sarebbe quella di avere le diagonali tra loro uguali con la medesima inclinazione (struttura regolare) ma, trattandosi di un'opera realizzata su una struttura esistente, ciò non è possibile.

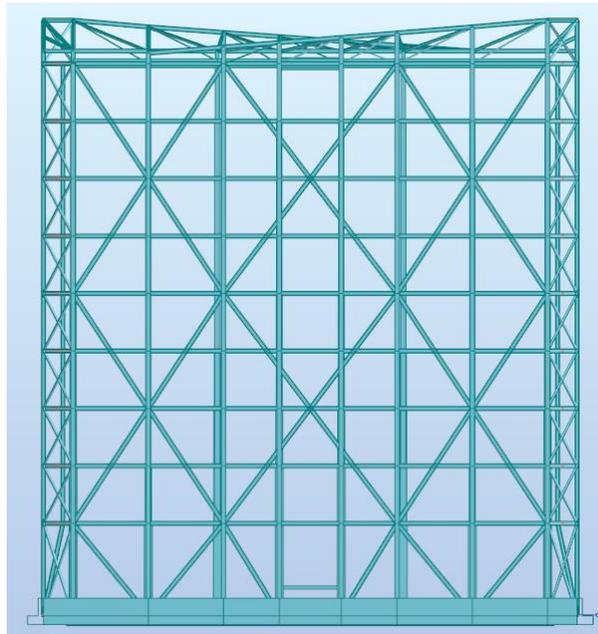


Figura 5.11: Vista frontale dell'edificio con esoscheletro

Sul lato corto si ha una disposizione a travi rinforzate con travi inclinate determinati, non dei diamanti, ma delle strutture a K (Figura 5.12).

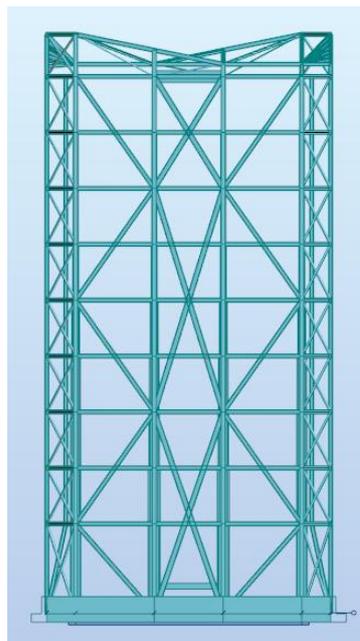


Figura 5.12: Vista laterale dell'edificio con esoscheletro

5.5 Il comportamento teorico

Identificato il contesto funzionale degli esoscheletri e gli approcci della normativa per la progettazione antisismica si può passare alla valutazione del loro funzionamento.

Per l'esecuzione dell'analisi si parte dalla ricerca dell' Ing. Martelli Lucrezia [53]. Lo schema che si assume è quello di un telaio piano a traversi rigidi, in cui le masse sono concentrate in corrispondenza dei soli piani orizzontali e le rigidezze sono riferite ai pilastri che collegano un piano ad un altro. A grandi linee, il sistema può essere comparato ad un oscillatore semplice; così facendo, esso sarà caratterizzato da un solo grado di libertà (*Figura 5.13*).

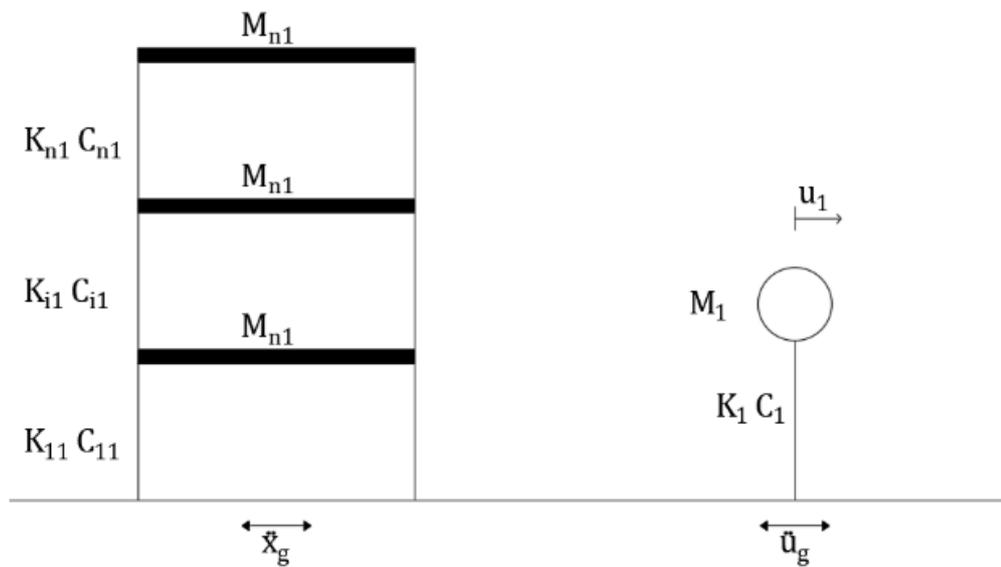


Figura 5.13: Modello della struttura isolata

Nell'immagine si possono notare alcuni particolari: la massa risulta concentrata solamente in un punto, la rigidezza è individuata da una molla priva di massa, mentre la dissipazione è garantita dalla presenza di uno smorzatore. Con le notazioni M , K , C si indicano rispettivamente la massa, la rigidezza e lo smorzamento dell'elemento; x e u identificano invece lo spostamento dell'elemento strutturale e del terreno. Si tratta di una struttura "non controllata" (schema con oscillatore semplice); si parla invece di "struttura controllata" quando si aggiunge all'esistente un'altra struttura esterna con relativo collegamento tra i due telai (due oscillatori semplici uniti per mezzo di un legame) (*Figura 5.14*) [53]. In questo caso si aggiunge anche la forza F : forza scambiata tra la struttura principale e quella esterna tramite il collegamento. Il modello, caratterizzato da una struttura primaria connessa ad un esoscheletro, può essere definito come 1+1 DOF.

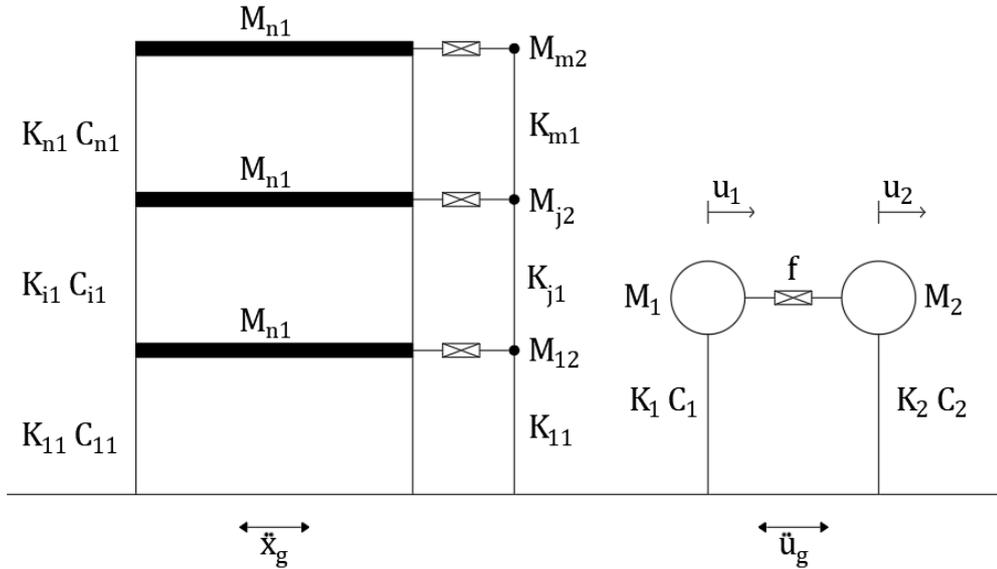


Figura 5.14: Modello della struttura controllata [53]

I legami tra la struttura e l'involucro esterno possono essere di differenti tipologie:

- link rigido;
- link di Hooke (collegamento a molla);
- link di Newton (collegamento con dissipatore);
- link di Kelvin-Voigt (collegamento con molla e smorzatore disposti in parallelo);
- link di Maxwell (collegamento con molla e dissipatore disposti in serie).

Ognuno di questi legami è caratterizzato da una propria legge analitica.

La forza f scambiata tra la struttura e l'esoscheletro, per mezzo del collegamento, risulta definita mediante la seguente formula:

$$f = \beta_k(u_2 - u_1) + \beta_c(\dot{u}_2 - \dot{u}_1) \quad (11)$$

I termini β_k e β_c , espressi in forma adimensionale, descrivono tale legame rappresentando la rigidezza K della molla e il coefficiente di smorzamento C del dissipatore:

$$\beta_k = \frac{K}{M_1 \Omega_1^2} \quad (12)$$

$$\beta_c = \frac{C}{M_1 \Omega_1} \quad (13)$$

Le equazioni che ne descrivono il comportamento possono essere così definite:

$$\ddot{u}_1 + 2\zeta_1 \dot{u}_1 + u_1 = -\ddot{u}_g + f \quad (14)$$

$$\ddot{u}_2 + 2\zeta_2 \alpha \mu \dot{u}_2 + \alpha^2 \mu u_2 = -\mu \ddot{u}_g - f \quad (15)$$

Mentre la pria espressione si riferisce alla struttura primaria (pedice 1), la seconda riguarda l'esoscheletro (pedice 2). Entrambe le equazioni sono espresse in forma adimensionalizzata e all'interno di esse compaiono f (legato al collegamento) e \ddot{u}_g (accelerazione al suolo).

Con ζ_1 e ζ_2 si indicano i rapporti di smorzamento e sono fissati a priori note le caratteristiche del materiale. I seguenti rapporti, in forma adimensionale sono così definiti:

$$\zeta_1 = \frac{C_1}{2\sqrt{K_1 M_1}} \quad (16)$$

$$\zeta_2 = \frac{C_2}{2\sqrt{K_2 M_2}} \quad (17)$$

Altri due parametri di progetto, note a priori le caratteristiche del sistema, sono il rapporto delle masse e delle frequenze definiti rispettivamente come μ ed α .

$$\mu = \frac{M_2}{M_1} \quad (18)$$

$$\alpha = \frac{\Omega_2}{\Omega_1} \quad (19)$$

Il tipo di collegamento preso in considerazioni è quello rigido.

L'equazione che governa il moto del sistema è così definita:

$$(1 + \mu)\ddot{u}_1 + (2\zeta_1 + 2\zeta_2\alpha\mu)\dot{u}_1 + (1 + \alpha^2\mu)u_1 = -(1 + \mu)\ddot{u}_g \quad (20)$$

Il risultato ottenuto rappresenta la risposta stazionaria al moto del sistema eccitato alla base per mezzo di una funzione armonica. Si indica con ω la *funzione di risposta in frequenza* o *funzione di amplificazione dinamica* [53]. Questa è data dal rapporto tra la pulsazione di input (per entrambe le strutture) e la pulsazione della struttura primaria:

$$\omega = \frac{\Omega}{\Omega_1} \quad (21)$$

Questo rapporto rappresenta la risposta stazionaria del sistema a seguito di un input sinusoidale (di tipo armonico); è una funzione complessa ed è determinata per via analitica:

$$H_{u_1/\ddot{u}_g}(i\omega) = -\frac{1 + \mu}{1 + \alpha^2\mu + i\omega(2\zeta_1 + 2\zeta_2\alpha\mu) - \omega^2(1 + \mu)} \quad (22)$$

Rappresenta la risposta in termini di spostamento e, trattandosi di una funzione complessa, si prende il valore assoluto. Per quanto riguarda l'accelerazione assoluta, data dalla somma dell'accelerazione relativa della struttura rispetto al suolo e l'accelerazione del terreno, l'espressione è così definita:

$$H_{\ddot{u}_{a1}/\ddot{u}_g}(i\omega) = 1 + \frac{\omega^2(1 + \mu)}{1 + \alpha^2\mu + i\omega(2\zeta_1 + 2\zeta_2\alpha\mu) - \omega^2(1 + \mu)} \quad (23)$$

È possibile ricavare il comportamento dinamico del sistema variando il parametro α al fine di quantificare l'efficacia di controllo della struttura con esoscheletro; si vuole valutare quanto il sistema è adatto a ridurre la risposta strutturale dal punto di vista dello spostamento e dell'accelerazione assoluta.

I parametri che si vogliono ottenere sono gli indici di prestazione (PI), questi quantificano l'efficacia del sistema controllato nell'abbattimento della risposta strutturale. Partendo da tali grandezze risulta possibile effettuare confrontare il comportamento della struttura controllata C e quella non controllata NC; il beneficio si traduce nell'abbattimento del picco di H. L'indice di prestazione per gli spostamenti I_D risulta così definito:

$$I_D = \max|H_D|^C / \max|H_D|^{NC} \quad (24)$$

L'analisi eseguita da Martelli Lucrezia, ottenuta variando il valore di α e μ mantenendo costanti ζ_1 e ζ_2 , mostra come il parametro che influenza maggiormente il sistema è α : le curve sono tendenzialmente rettilinee e parallele all'asse di μ e di conseguenza la prestazione non cambia in maniera rilevante (Figura 5.15) [53].

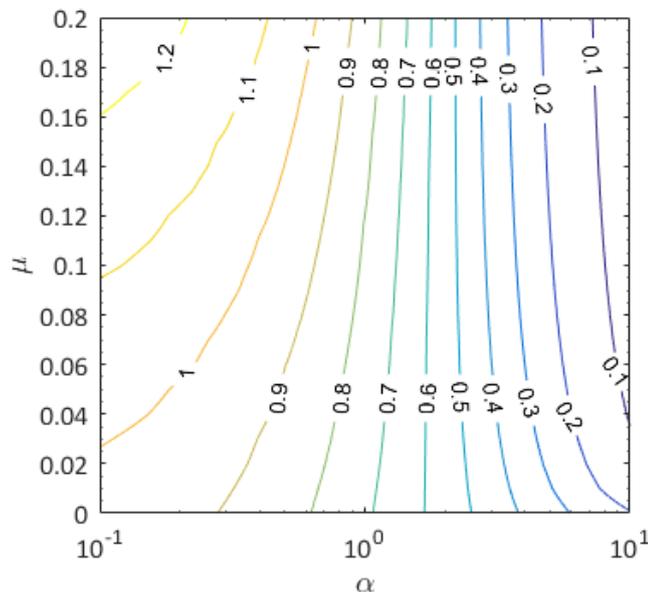


Figura 5.15: Variazione indice prestazionale per gli spostamenti al variare di α e μ [53]

5.6 Dati di input

La vulnerabilità di una struttura indica quanto questa sia suscettibile a subire danni per effetto di una determinata azione sismica. L'operazione di valutazione della suscettibilità della struttura si compone di più fasi: dalla modellazione della struttura e definizione dei materiali (realizzata su Revit e trasferita poi su Robot) alla identificazione delle azioni e delle loro combinazioni (secondo la NTC 2018) fino all'esecuzione dell'analisi strutturale (analisi dinamica lineare). La base fondamentale, nonché la più delicata, su cui si fonda l'analisi è la modellazione strutturale; da essa dipendono i risultati del comportamento della costruzione sotto azione sismica e dunque l'affidabilità dell'analisi stessa. Si vuole sostituire alla struttura reale, con relative azioni, un modello matematico valido per la valutazione delle sollecitazioni.

5.6.1 Analisi dei carichi

L'analisi sismica dell'edificio è eseguita con il software Robot Structural Analysis Professional importando il modello realizzato su Revit. Entrambi sono software proprietari Autodesk e il passaggio da un programma all'altro è molto rapido. Risulta possibile trasferire il modello analitico della struttura e con esso anche le proprietà associate a ciascun materiale in esso presente. Il modello analitico è composto da travi, pilastri, solai, fondazioni e setti; sono esclusi da esso i muri di tamponamento esterno, i muri divisorii interni e le pavimentazioni. Il modello analitico è dunque composto solamente da tutti quegli elementi che costituiscono il modello strutturale, sono da essi esclusi dunque tutti gli elementi che compongono i permanenti non strutturali. Essendo note le caratteristiche dei materiali e le sezioni degli elementi strutturali, il software calcola in automatico i relativi pesi propri. Invece, quelli degli elementi non strutturali sono così definiti:

- peso per unità di superficie del massetto e della pavimentazione dell'edificio: 1.25 kN/m²;
- peso per unità di superficie della pavimentazione dell'esoscheletro: 1.15 kN/m²;
- peso per unità di superficie dei muri divisorii interni: 1.20 kN/m²;
- peso per unità di lunghezza dei muri di tamponamento esterni: 5.90 kN/m.

I carichi variabili, legati alla destinazione d'uso, sono riferiti ad un edificio ad uso residenziale (categoria A) e i relativi valori sono definiti dalla NTC 2018:

- carico per unità di superficie per attività domestiche e residenziali: 2.00 kN/m²;
- carico per unità di superficie per scale comuni, balconi e ballatoi: 4.00 kN/m²;
- carico per unità di superficie per la manutenzione e riparazione delle coperture: 0.50 kN/m².

5.6.2 Parametri sismici

L'azione sismica, come detto, è costituita da tre componenti traslazionali indipendenti. Di queste si considerano solo le componenti orizzontali parallele alle direzioni principali x e y della struttura; la componente agente lungo z viene trascurata. La pericolosità sismica è definita dall'accelerazione orizzontale massima attesa a_g in condizioni di campo libero su terreno infinitamente rigido e con superficie topografica orizzontale.

Con riferimento a ciascuna delle prefissate probabilità di eccedenza P_{V_R} , nel periodo di riferimento V_R , risulta possibile definire gli spettri di risposta individuando:

- a_g accelerazione orizzontale massima al sito;
- F_0 valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro di accelerazione orizzontale;
- T^*_C periodo d'inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

L'azione sismica agente sulla struttura viene valuta dunque a partire dal periodo di riferimento. Il valore di V_R è dato dal prodotto della vita nominale V_N e dalla classe d'uso C_U . La struttura in esame è un'opera ordinaria in calcestruzzo armato avente V_N di 50 anni con classe d'uso II e dunque valore di C_U pari ad 1 (edificio con normale affollamento dei locali). Di conseguenza il V_R considera come intervallo di riferimento un periodo di almeno 50 anni.

$$V_R = V_N \cdot C_U = 50 \cdot 1 = 50 \text{ anni} \quad (25)$$

L'edificio in esame, è caratterizzato da una categoria di sottosuolo, terreno su cui poggia la struttura, di tipo C (depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti). La categoria topografica presa in esame è invece la T1 (superficie pianeggiante).

Nota la posizione della costruzione si possono determinare i parametri sismici e gli spettri normativi. L'edificio sorge a Torino (TO) e presenta le seguenti coordinate geografiche:

Latitudine: 45° 02' 55.2" N

Longitudine: 7° 37' 48.7" E

Lo spettro di risposta per il lungo designato è definito nella *Figura 5.16*.

Spettri di risposta elastici per i diversi Stati Limite

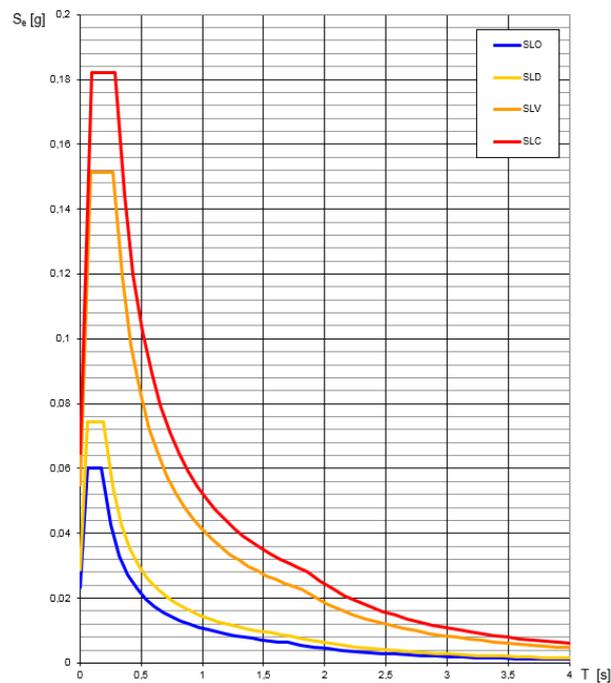


Figura 5.16: Spettro di risposta alle coordinate di riferimento per i vari stati limite

Nella Tabella 5.2 vengono invece mostrati i relativi parametri sismici.

Tabella 5.2: Parametri sismici per i vari stati limite

Sati Limite	T_R [anni]	a_g [g]	F_0 [-]	T_c^* [s]
SLO	30	0.023	2.587	0.177
SLD	50	0.029	2.592	0.195
SLV	475	0.055	2.760	0.272
SLC	975	0.065	2.811	0.287

5.6.3 Combinazione delle azioni

La combinazione dell'azione sismica si ottiene a partire dai valori massimi della risposta per ciascuna componente orizzontale dell'azione sismica applicata separatamente; queste devono essere combinate sommando ai massimi ottenuti per l'azione applicata in una direzione il 30% dei massimi ottenuti per l'azione applicata nell'altra direzione (Tabella 5.3).

Tabella 5.3: Combinazioni dell'azione sismica

1	$+E_x + 30\%E_y$	5	$+E_y + 30\%E_x$
2	$+E_x - 30\%E_y$	6	$+E_y - 30\%E_x$
3	$-E_x + 30\%E_y$	7	$-E_y + 30\%E_x$
4	$-E_x - 30\%E_y$	8	$-E_y - 30\%E_x$

A ciascuna combinazione bisogna poi sommare i valori degli effetti dovuti ai carichi gravitazionali valutati nella combinazione sismica (NTC 18):

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} Q_{k1} + \psi_{22} Q_{k2} + \dots \quad (26)$$

assumendo carichi da neve $\psi_{2,i} = 0$; analogamente, anche per i carichi da vento si considera $\psi_{2,i} = 0$.

5.6.4 Analisi dinamica lineare

L'analisi dinamica lineare può essere svolta mediante analisi modale con spettro di risposta o mediante integrazione al passo delle equazioni del moto.

Essa permette di determinare i modi di vibrare della struttura e, successivamente, viene effettuato il calcolo degli effetti dell'azione sismica. Per tener conto della non contemporaneità di tutti gli effetti massimi per ciascun modo di vibrare individuato, questi vengono opportunamente combinati. Bisogna prendere in considerazione tutti i modi di vibrazione con massa partecipante superiore al 5% e comunque un numero di modi la cui massa partecipante totale sia superiore all'85%. Le due componenti orizzontali dell'azione sismica si considerano agenti simultaneamente e per queste viene adottata, ai fini della combinazione degli effetti, una combinazione quadratica completa (CQC) per ciascun modo. Questo metodo di analisi considera il comportamento dissipativo della struttura tramite l'impiego del fattore di struttura q ; d'altro canto, però, non può cogliere le variazioni nella risposta della struttura che si verificano man mano che aumentano i danneggiamenti che interessano i vari elementi strutturali.

L'analisi modale è stata effettuata considerando i primi 5 modi di vibrare della struttura. Come anticipato, per tener conto della non contemporaneità di tutti gli effetti massimi per ciascun modo di vibrare individuato, occorre comporli mediante la combinazione quadratica completa:

$$E = \left(\sum_i \sum_j \rho_{ij} E_i E_j \right)^{1/2} \quad (27)$$

E è il valore totale della componente sismica che si sta considerando; E_i è il valore della medesima componente dovuta al modo i ; E_j è il valore della medesima componente dovuta al modo j ; ρ_{ij} è il coefficiente di correlazione tra il modo i e il modo j , espresso con un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente $\xi = 0.05$.

Capitolo 6

Analisi strutturale

I capitoli precedenti hanno definito le condizioni sismiche alle quali la struttura sarà sottoposta e le caratteristiche geometriche e tipologiche dell'esoscheletro. Il passo successivo consiste nel definire i modelli strutturali della struttura originale e della struttura stabilizzata con esoscheletro.

Le dimensioni dei pilastri e delle travi, ricavati dalle planimetrie strutturali, e i relativi materiali sono stati definiti su Revit per poi essere implementati su Robot. Partendo dalla costruzione reale la struttura esistente può essere schematizzata sul software come mostrato in *Figura 6.1*.

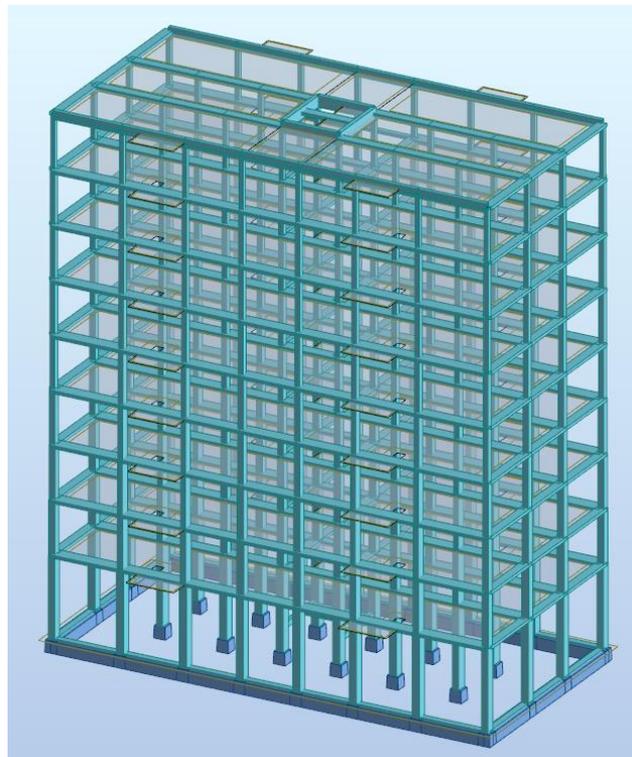


Figura 6.1: Modello strutturale dell'edificio esistente

Partendo dalle fondamenta l'edificio presenta una trave di fondazione continua sulla quale si vanno ad innestare i pilastri perimetrali; per i pilastri interni nei progetti strutturali sono invece previsti dei plinti di fondazione. Il modello è molto semplice ed è caratterizzato da una distribuzione spaziale degli elementi molto regolare.

L'obiettivo dell'analisi sismica è quello di definire le dimensioni e caratteristiche degli elementi da utilizzare nell'esoscheletro affinché si possa stabilizzare l'edificio.

La *Figura 6.2* permette di capire come viene rappresentato il modello della struttura con esoscheletro software di calcolo strutturale.

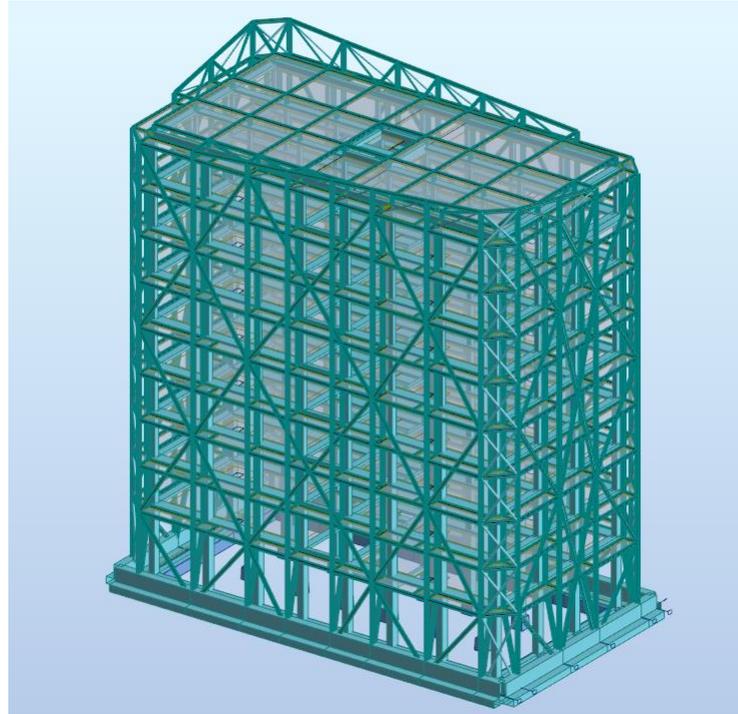


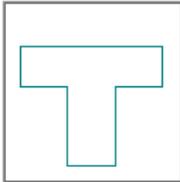
Figura 6.2: Modello strutturale dell'edificio con esoscheletro

Per quanto riguarda gli elementi strutturali adottati, la definizione parte dalle fondazioni. L'esoscheletro poggia su una trave di fondazione a T rovescia scollegata dalle fondazioni della struttura originaria. La trave di fondazione viene posta in una condizione di terreno alla Winkler (trave su letto di molle) e presenta le seguenti caratteristiche geometriche e meccaniche (Figura 6.3).

N. barra: 2548 Sezione: 180x60/150x40

Dimensioni:

HY (cm)	HZ (cm)
180,0	150,0



Proprietà di sezione:

AX (cm ²)	IX (cm ⁴)	IY (cm ⁴)	IZ (cm ⁴)
15000,00	10571366,6	27125000,0	26100000,0

Proprietà di materiale:

E (MPa)	G (MPa)	NI	LX (1/°C)	RO (kN/m ³)	Re (MPa)
28500,00	16300,00	0,17	0,00	24,53	25,00

Figura 6.3: Caratteristiche geometriche trave di fondazione

Sulla fondazione si vanno ad innestare i pilastri dell'esoscheletro e le relative diagonali. Il software calcola in automatico i pesi degli elementi strutturali. Per l'esoscheletro questo carico è stato aumentato del 5% al fine di considerare gli incrementi di peso indotti dalle giunzioni e dalla zincatura. In base alla tipologia strutturale adottata, per poter resistere all'azione sismica, si sono scelte le seguenti tipologie di travi:

- IPE 300 per gli elementi diagonali incrociati lungo il lato corto;
- IPE 240 per tutte le travi orizzontali, le diagonali lungo il lato corto e gli elementi inclinati non incrociati sul lato corto;
- IPE 200 per le travature sulla copertura;
- HEA 240 per le travi verticali;
- elementi tubolari per le diagonali ai vertici.

L'esoscheletro è distanziato dalla struttura reale di 1.5 m. Si viene così a creare una intercapedine aumentando l'efficienza termica della struttura sia durante i periodi invernali (coibentazione) che quelli estivi (aerazione).

La copertura è stata rimossa e su di essa è stata realizzata una piattaforma, allo scopo di creare uno spazio comune per gli inquilini dell'edificio. Questa nuova superficie, e i relativi carichi associati, andranno a scaricare non sulle fondazioni della struttura esistente ma su quelle dell'esoscheletro.

6.1 Struttura esistente

L'analisi modale eseguita su Robot fornisce le deformate modali. L'analisi è stata eseguita nei confronti dello stato limite di danno (SLD) per lo stato limite di esercizio (SLE) e allo stato limite di salvaguardia della vita (SLD) per lo stato limite ultimo (SLU). La normativa chiama con "massa partecipante" il rapporto tra massa modale e massa totale ed afferma di dover considerare tutti quei modi che ne abbiano almeno il 5%, andando nel complesso ad analizzare quelli per cui la cui somma della massa eccitata sia almeno pari all'85% [§7.3.3.1]. La *Tabella 6.1* mostra con maggiore chiarezza i risultati ottenuti.

Tabella 6.1: Risultati analisi modale

Modi	Mas mod UX (%)	Mas mod UY (%)	Mas cor UX (%)	Mas cor UY (%)	Mas tot UX (kg)	Mas tot UY (kg)
1	0,17	77,88	0,17	77,88	3242382,66	3242382,66
2	80,91	78,04	80,74	0,16	3242382,66	3242382,66
3	80,94	78,05	0,03	0,00	3242382,66	3242382,66
4	80,97	89,64	0,03	11,60	3242382,66	3242382,66
5	92,33	89,68	11,36	0,03	3242382,66	3242382,66
6	92,34	89,68	0,01	0,00	3242382,66	3242382,66
7	95,95	89,69	3,61	0,01	3242382,66	3242382,66
8	95,96	94,00	0,01	4,32	3242382,66	3242382,66
9	95,96	94,00	0,00	0,00	3242382,66	3242382,66
10	97,54	94,00	1,58	0,00	3242382,66	3242382,66

Per entrambi gli stati limite, nelle due direzioni, la partecipazione di massa modale almeno pari all'85% la si ottiene nei primi 5 modi. Nelle immagini seguenti (Figure 6.4, 6.5 e 6.6) vengono mostrate i primi 4 modi di vibrazione: il primo modo è di traslazione lungo y, il secondo di traslazione lungo x e il terzo di torsione.

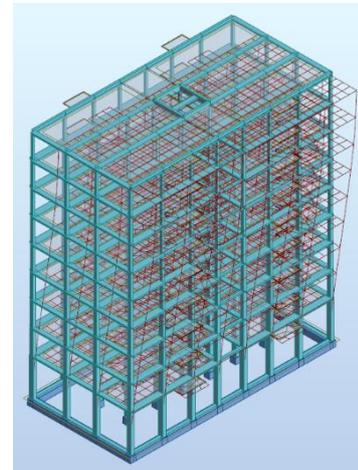
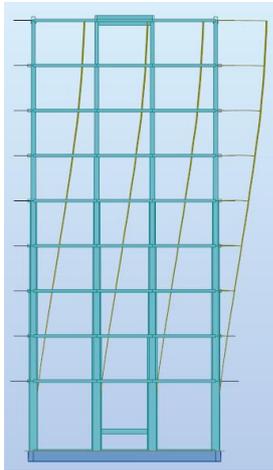


Figura 6.4: Primo modo di vibrare (traslazione lungo y)

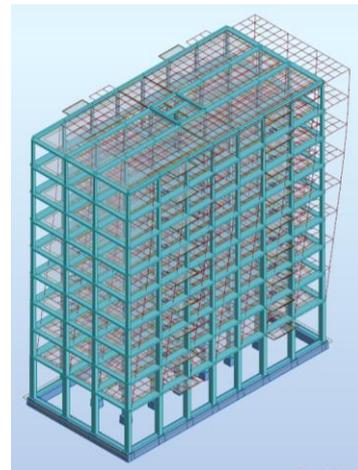
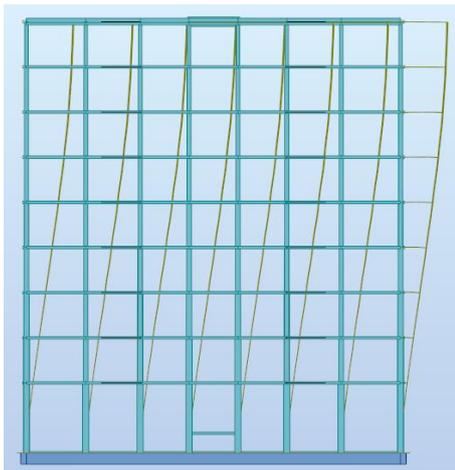


Figura 6.5: Secondo modo di vibrare (traslazione lungo x)

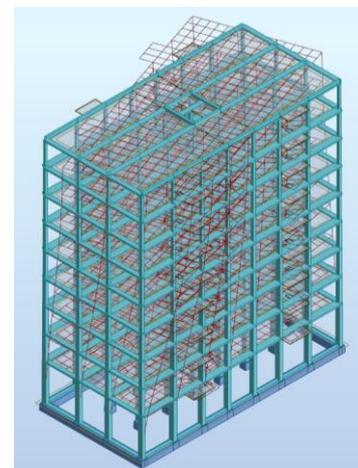
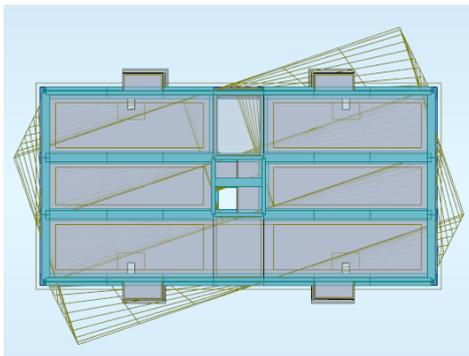


Figura 6.6: Terzo modo di vibrare (torsione)

Un parametro importante da dover valutare è lo spostamento massimo subito dalla struttura sotto l'azione sismica. Nella *Tabella 6.2* vengono mostrati gli spostamenti massimi per i due stati limite considerati (SLD, SLV) nelle direzioni x e y.

Tabella 6.2: Spostamenti in direzione x e y per i due stati limite – Struttura originaria

	$S_{max,x}$ [mm]	$S_{max,y}$ [mm]
SLD direzione x	25	1
SLD direzione y	1	25
SLV direzione x	71	1
SLV direzione y	1	72

La performance in termini di spostamento deve essere valutata anche nei confronti dei *drift* d'interpiano. Nelle *Figure 6.7* e *6.8* vengono valutati i *drift* in direzione x e y per i due stati limite analizzati.

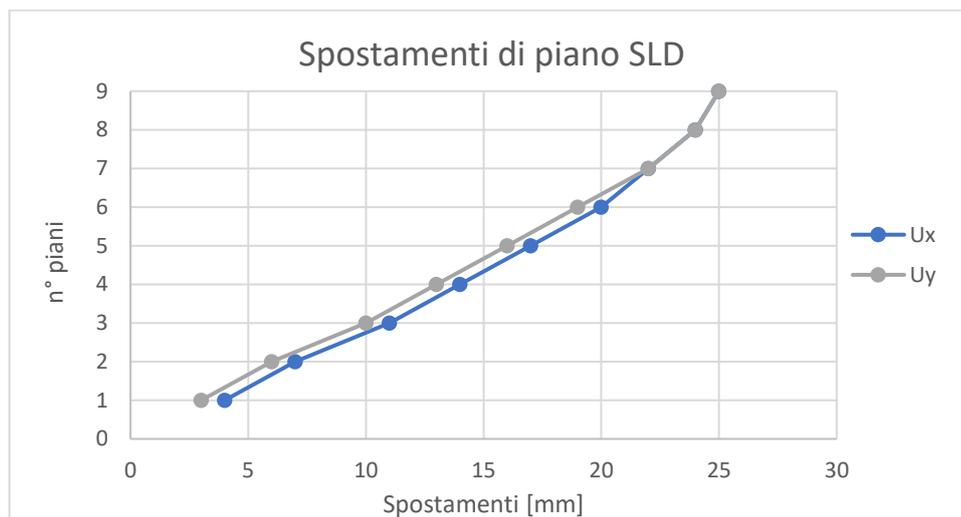


Figura 6.7: Spostamenti di piano allo SLD – Struttura originaria

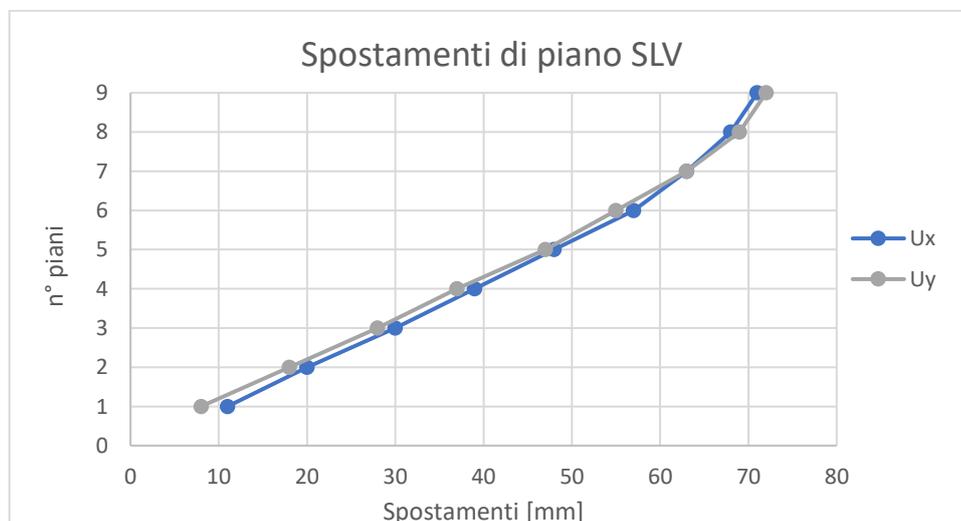


Figura 6.8: Spostamenti di piano allo SLV – Struttura originaria

Sempre in riferimento ai medesimi stati limite si possono valutare le sollecitazioni di taglio agenti alla base della struttura. Per lo SLD lo sforzo maggiore sui pilastri vale $T_{\max,x} = 557.76$ kN lungo x e $T_{\max,y} = 536.16$ kN lungo y ; mentre per lo SLV il taglio massimo è pari a $T_{\max,x} = 1598.89$ kN lungo x e $T_{\max,y} = 1528.16$ kN lungo y.

Come è lecito aspettarsi, allo SLU il taglio risulta maggiore rispetto allo SLE.

6.2 Struttura con pseudo-diagrid

Per sua definizione una struttura a *diagrid* dovrebbe essere priva di elementi verticali. Nell'esoscheletro si aggiungono tuttavia dei pilastri in acciaio HEA 240 (in posizione speculari a quelli cementizi della struttura primaria) collegati tra loro tramite elementi orizzontali IPE 240. Non si può dunque parlare di vero e proprio *diagrid*; la struttura ottenuta può essere definita come "*pseudo-diagrid*" [53]. Le soluzioni adottate permettono di ottenere una struttura più rigida con conseguente diminuzione del periodo di vibrazione rispetto al caso precedente.

Dall'analisi modale si identificano quali modi siano i più influenti. Come nel caso precedente, l'analisi è stata eseguita in riferimento allo SLD e SLV. La *Tabella 6.3* mostra con maggiore chiarezza i risultati ottenuti.

Tabella 6.3: Risultati analisi modale

Modi	Mas mod UX (%)	Mas mod UY (%)	Mas cor UX (%)	Mas cor UY (%)	Mas tot UX (kg)	Mas tot UY (kg)
1	0,00	81,44	0,00	81,44	2015495,68	2015495,68
2	84,14	81,44	84,14	0,00	2015495,68	2015495,68
3	84,16	81,46	0,01	0,01	2015495,68	2015495,68
4	84,16	92,15	0,00	10,69	2015495,68	2015495,68
5	93,92	92,15	9,76	0,00	2015495,68	2015495,68
6	94,05	92,15	0,13	0,00	2015495,68	2015495,68
7	94,05	95,49	0,00	3,35	2015495,68	2015495,68
8	96,07	95,49	2,02	0,00	2015495,68	2015495,68
9	96,32	95,49	0,25	0,00	2015495,68	2015495,68
10	96,32	95,49	0,00	0,00	2015495,68	2015495,68

Visionando i risultati, i modi che mobilitano almeno l'85% della massa modale, sia lungo x che lungo y, sono i primi 5. Nelle immagini seguenti (*Figure 6.9, 6.10 e 6.11*) vengono mostrati i 3 modi di vibrare principali: il primo modo è di traslazione lungo y, il secondo di traslazione lungo x e il terzo di torsione.

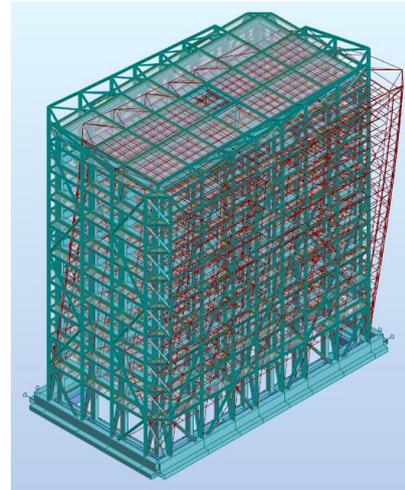
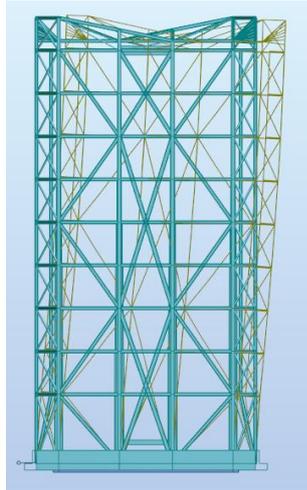


Figura 6.9: Primo modo di vibrare (traslazione lungo y)

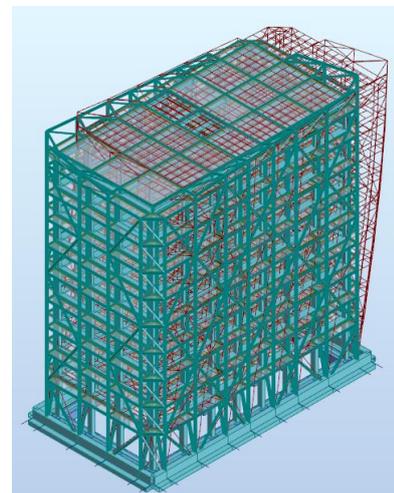
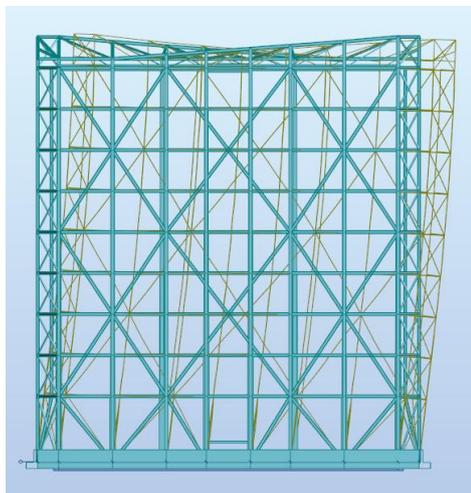


Figura 6.10: Secondo modo di vibrare (traslazione lungo x)

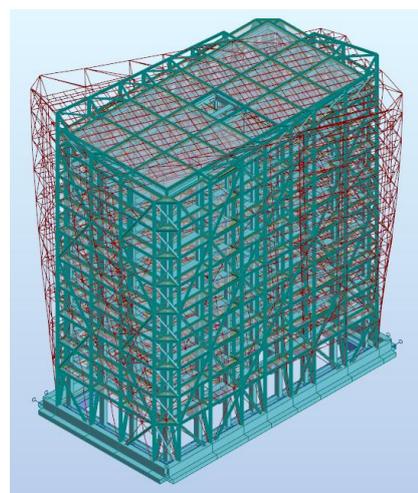
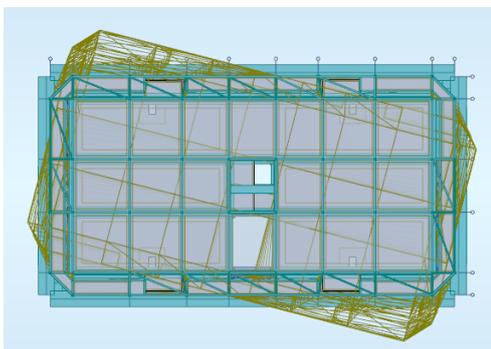


Figura 6.11: Terzo modo di vibrare (torsione)

Sottoposto ad azione sismica il sistema si deforma, ma si prevedono degli spostamenti minori rispetto alla struttura originaria. Nella *Tabella 6.4* vengono mostrati gli spostamenti massimi per i due stati limite considerati (SLD, SLV) nelle direzioni x e y.

Tabella 6.4: Spostamenti in direzione x e y per i due stati limite - Esoscheletro

	$S_{max,x}$ [mm]	$S_{max,y}$ [mm]
SLD direzione x	9	0
SLD direzione y	0	14
SLV direzione x	23	1
SLV direzione y	1	35

Nelle *Figure 6.12* e *6.13* vengono valutati gli spostamenti di piano in direzione x e y per i due stati limite analizzati.

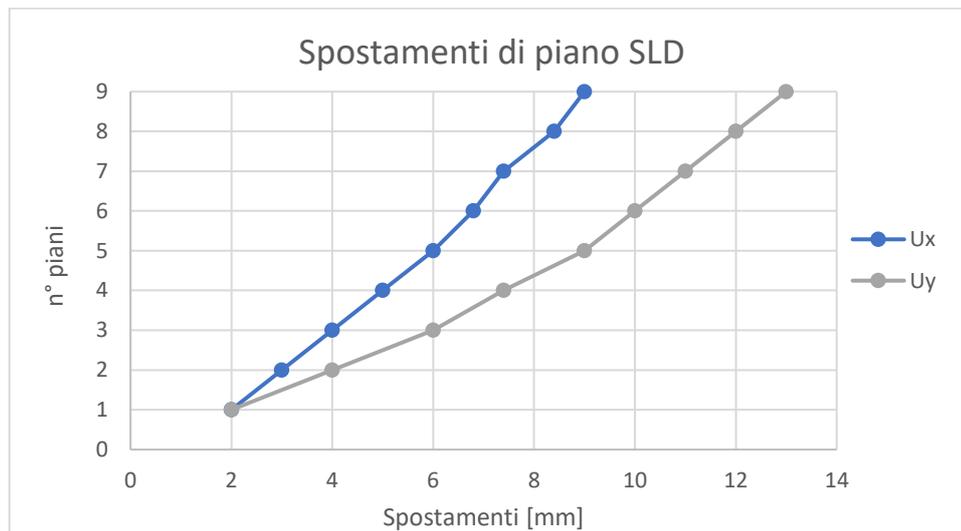


Figura 6.12: Spostamenti di piano allo SLD - Esoscheletro

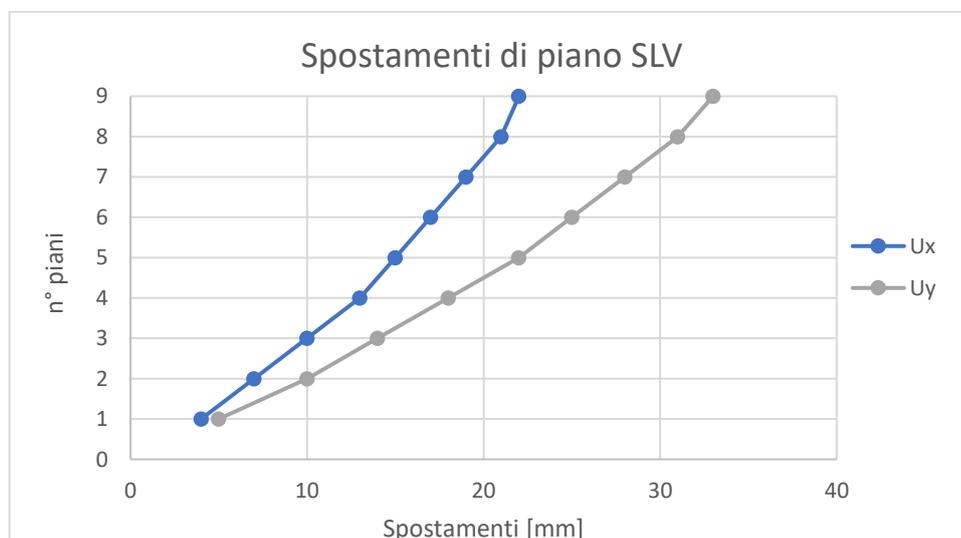


Figura 6.13: Spostamenti di piano allo SLV - Esoscheletro

Come anticipato, per mezzo dell'esoscheletro si è ottenuta una struttura più rigida, di conseguenza questa sarà assoggettata ad una maggiore sollecitazione di taglio alla base. Per lo SLD lo sforzo maggiore vale $T_{\max,x} = 1470.86$ kN lungo x e $T_{\max,y} = 772.92$ kN lungo y; mentre per lo SLV il taglio massimo è pari a $T_{\max,x} = 3686.26$ kN lungo x e $T_{\max,y} = 1892.71$ kN lungo y.

6.3 Analisi dei risultati

L'analisi dei risultati può essere suddivisa in due macro-settori: gli spostamenti di piano ed i tagli alla base.

Una volta determinati gli spostamenti per ogni direzione e per ogni stato limite è possibile confrontarli tra loro e valutare il beneficio indotto dalla presenza dell'esoscheletro. Si calcola per ogni configurazione la differenza tra i valori numerici ottenuti al piano i-esimo e quelli del livello sottostante così da determinare il *drift* d'interpiano. La NTC 2018 stabilisce che, per lo SLD preso in considerazione, il *drift* massimo deve essere minore di 0.005 volte l'altezza di interpiano. Questo può essere normalizzato rispetto all'altezza di piano h diventando così un valore adimensionale.

Nelle *Figura 6.14* e *6.15* vengono mostrate le evoluzioni degli spostamenti di ciascun piano, sia lungo x che lungo y, nel caso della struttura esistente o di quella controllata.

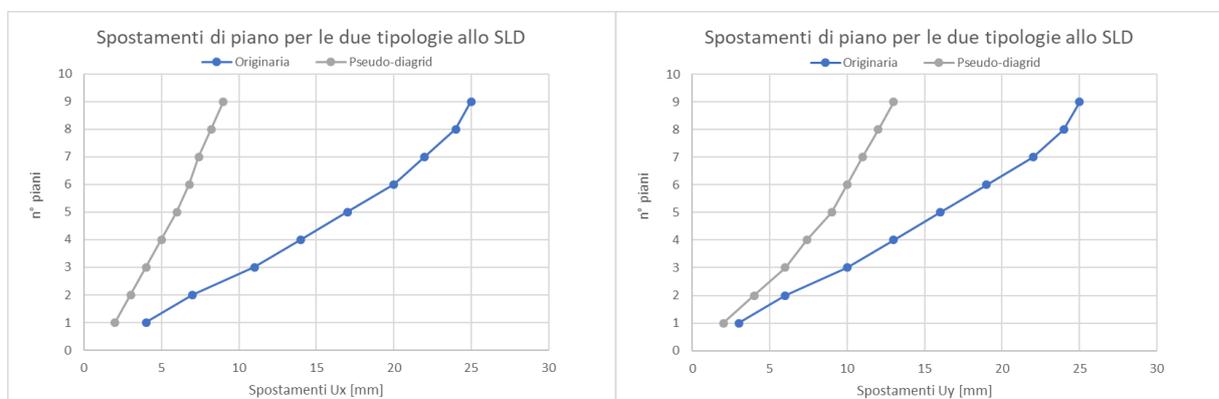


Figura 6.14: Confronto degli spostamenti - SLD

Già dalla evoluzione degli spostamenti allo SLD ci si rende conto di quanto sia favorevole la realizzazione dell'esoscheletro: la configurazione adottata permette infatti di ottenere una diminuzione importante in cui lo spostamento massimo si riduce del 64% lungo x e del 48% lungo y.

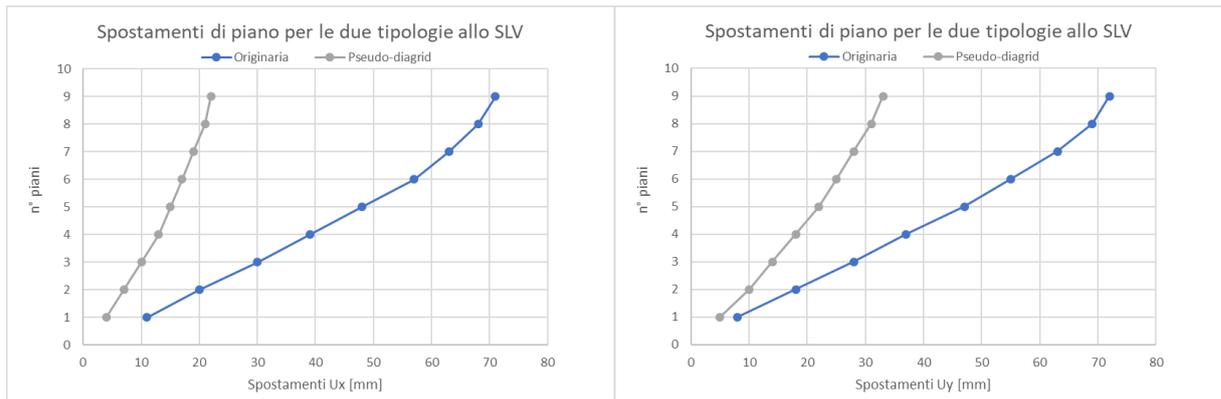


Figura 6.15: Confronto degli spostamenti - SLV

Così come per lo SLD, anche per lo SLV si ottiene una riduzione importante degli spostamenti secondo le due direzioni. Lo spostamento massimo, passando da una configurazione all'altra, si riduce del 69% lungo x e del 54% lungo y.

I comportamenti sono molto simili tra loro e differiscono solo per la loro l'entità: maggiori per lo SLV e minori per lo SLD.

In riferimento agli spostamenti si mettono infine a confronto i *drift* d'interpiano normalizzati e si verifica che questi rispettino il limite normativo. L'andamento del *drift* normalizzato è mostrato in Figura 6.16.

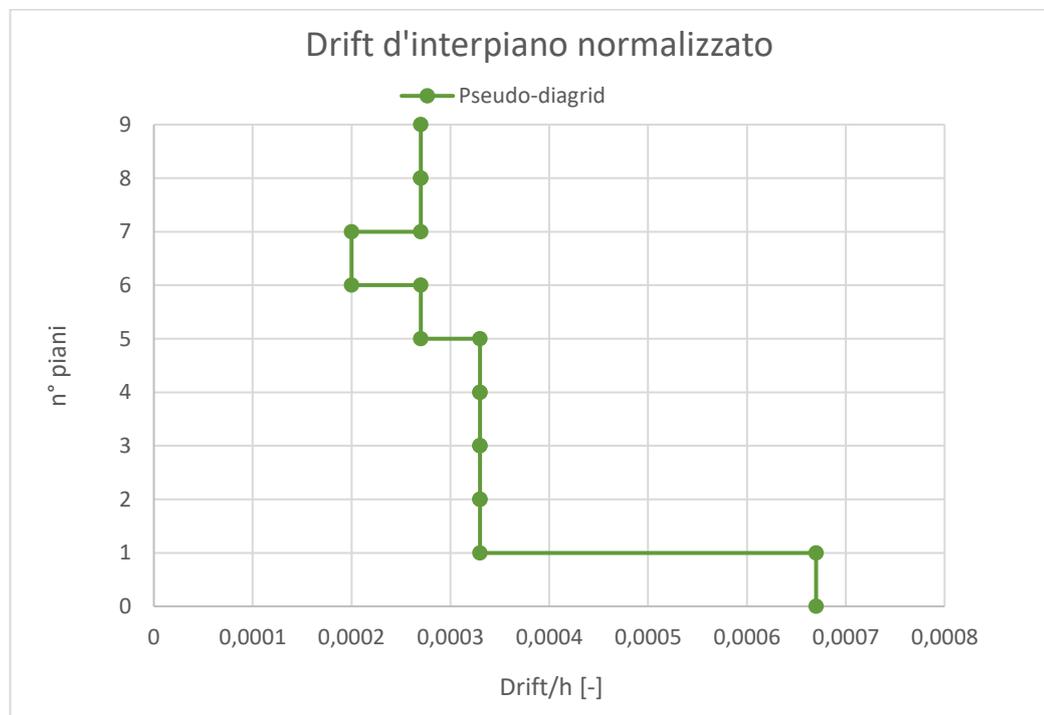


Figura 6.16: Drift di piano normalizzati

I valori ottenuti sono decisamente lontani dalla soglia 0.005.

Dal punto di vista delle sollecitazioni, l'attenzione si focalizza sul taglio alla base. Dall'analisi dinamica lineare svolta, Robot permette di ricavare i valori delle forze sismiche agenti ad ogni quota. La somma di tutte le sollecitazioni agenti su ogni piano fornisce la forza sismica equivalente, che si può definire anche come taglio alla base. Queste grandezze sono paragonate tra la struttura originaria e la struttura stabilizzata. Per tale operazione si è fatto uso degli appostiti diagrammi delle sollecitazioni (taglio) per ogni piano determinando il taglio alla base come lo sforzo che sollecita la struttura alla quota più bassa.

Osservando i dati numerici per gli stati limite SLD e SLV si nota come la forza sismica equivalente aumenta se si introduce una struttura esterna; ciò è dovuto ad un incremento della rigidezza con conseguente riduzione del periodo di vibrazione (*Tabella 6.5*).

Tabella 6.5: Spostamenti in direzione x e y per i due stati limite - Esoscheletro

	$T_{\max,x}$ [kN]	$T_{\max,y}$ [kN]
SLD originaria	557.76	536.16
SLV originaria	1598.89	1528.16
SLD con esoscheletro	1470.86	772.92
SLV con esoscheletro	3686.26	1892.771

L'incremento dell'azione di taglio è molto elevato lungo x (lato lungo dell'edificio), imputabile principalmente al notevole incremento della rigidezza indotto dalla struttura a *diagrid*. Anche lungo y (lato corto) si ottiene un incremento dell'azione di taglio alla base. L'aumento in questo caso non è elevato come avviene lungo x, infatti la disposizione degli elementi di rinforzo lungo il lato corto è minore (si è comunque provveduto ad incrementare la sezione delle travi).

Nonostante i valori maggiori di taglio, come ci si aspetta il *diagrid* permette di scaricare la struttura originaria dallo sforzo di taglio, attribuendo a sé la maggior parte del contributo. Questo avviene poiché riesce ad assorbire lo sforzo normale e lo riporta sotto forma di componente orizzontale. L'azione di taglio, incrementata, andrà infatti a suddividersi in parte sulla struttura originaria (minore rispetto alla sola struttura isolata) e in parte sull'esoscheletro (azione maggiore).

Capitolo 7

Conclusioni e sviluppi futuri

Lo studio nasce dalla volontà di trovare una soluzione alternativa per il retrofit de patrimonio edilizio, oramai vetusto e con deficit strutturali e prestazionali. Alla luce dei risultati ottenuti si osserva come la realizzazione di una struttura esterna all’edificio permetta di rinforzare la struttura e al tempo stesso rendere tale operazione sostenibile.

La prima parte del seguente lavoro ha valutato la fattibilità, in termini di carichi ambientali, di due possibili soluzioni al problema in esame. Sono stati valutati come possibili scenari la demolizione e ricostruzione dell’edificio e la riqualificazione dello stesso tramite un esoscheletro esterno. L’analisi dell’impatto ambientale è stata condotta in riferimento al *Life Cycle Assesment* (LCA). Tramite tale analisi è stato possibile valutare gli impatti, le emissioni e i danni indotti sull’ambiente e sulla salute umana per ogni materiale o fase lavorativa coinvolta nei due scenari. Lo studio è stato inoltre eseguito rispettando la direttiva europea 2008/98/CE sul riciclo del materiale demolito (almeno il 70% in massa). Ogni scenario è dunque suddiviso a sua volta in due sotto scenari, che si esegua o meno il riciclo dei detriti. I risultati globali dell’analisi si traducono nell’istogramma sottostante (*Figura 7.1*).

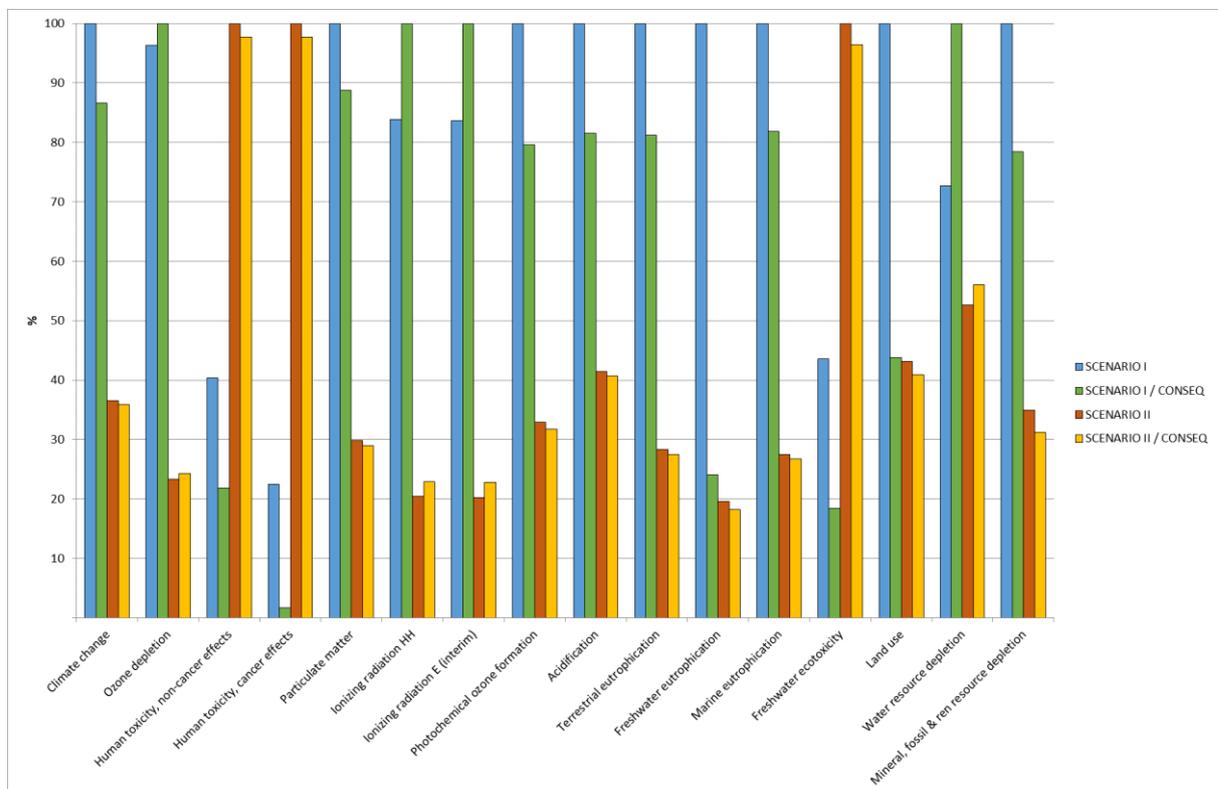


Figura 7.1: Confronto degli impatti dei quattro scenari per tutte le categorie analizzate

Gli impatti sono stati valutati su molteplici categorie, tra cui una delle più importanti ed a cui oggi l'opinione pubblica dà maggiore rilevanza, è quella relativa al cambiamento climatico (*Climate change*). Altri impatti considerati riguardano invece possibili danni alla salute umana (tossicità cancerogena o no cancerogena), all'ambiente (riduzione della fascia di ozono, uso del terreno, inquinamento della falda) o alla riduzione delle materie prime e dei combustibili. I risultati ottenuti dalla LCA mostrano come, a proposito del cambiamento climatico, lo Scenario I sia quello maggiormente impattante (1261964 kg CO₂ eq). Solamente riciclando le macerie derivate dalla demolizione della struttura (85.22%) il vantaggio ambientale che si ottiene è importante: il 13.39% con un'emissione pari a 1092994 kg CO₂ eq. Soffermandosi sui precedenti risultati, nel caso in cui si dovesse percorrere la strada della demolizione e ricostruzione, il riciclo dei detriti contribuirebbe ad un guadagno ambientale rilevante. È in questo contesto che si inserisce la direttiva europea: riutilizzare le macerie per produrre un nuovo materiale riducendo quindi l'inquinamento indotto dall'uso di materie vergini e il deposito nelle discariche. Per questi due scenari l'impatto maggiore è dato dai materiali edili e in minor misura dai consumi per i macchinari. Dai risultati dell'analisi senza riciclo si nota come i principali contributi siano dati da mattoni (39.12%), cemento (18.88%), acciaio (8.35%), materiali ceramici (6.22%), discarica (3.01%), consumi fossili (12.49%) ed energetici (6.2%).

Coerentemente a quanto ipotizzato inizialmente, lo Scenario II permette di abbattere drasticamente le emissioni di CO₂, con una riduzione nelle emissioni pari al 67.78%. Lo Scenario II determina infatti una produzione di 460601 kg CO₂ eq. Così come per lo Scenario I anche per lo Scenario II si è valutato l'impatto in condizioni di riciclo; in tal senso il vantaggio ottenuto non è molto elevato, pari solo allo 0.55%. Questa bassa riduzione d'impatto è imputabile principalmente ad una scarsa produzione di macerie (la soluzione ad esoscheletro nasce proprio dalla volontà di essere una soluzione poco invasiva per la struttura stessa e per chi la abita). In tale scenario, per tutte le categorie d'impatto, il carico ambientale maggiore, quasi assoluto, è dato dall'acciaio per l'esoscheletro. Le tonnellate di acciaio richieste sono infatti decisamente maggiori rispetto a quelle dei materiali secondari quali vetro, calcestruzzo e ceramici.

Per quasi tutte le categorie è lo Scenario II il più performante; i soli impatti per i quali ciò non avviene sono la tossicità umana e l'ecotossicità dell'acqua. Questa inversione dei risultati è data principalmente dalla tossicità della produzione dell'acciaio presente in grandi quantità nel secondo scenario (emissione dalle fonderie di sostanze dannose per l'uomo e l'acqua dolce).

Dall'analisi dei risultati si evince come il secondo scenario risulti più conforme ad uno "sviluppo sostenibile" dell'edilizia; a partire da ciò, nella seconda parte di tale lavoro di tesi, si è pertanto approfondita la risposta strutturale dell'edificio riqualificato. Tramite il software Revit si è modellato l'esoscheletro e su Robot si è valutato il relativo comportamento

strutturale sotto un'azione sismica. La soluzione scelta per stabilizzare l'edificio è quella di una struttura a *pseudo-diagrid*, così definita perché contrariamente ad una struttura a *diagrid*, in cui sono presenti solo elementi diagonali, sono introdotti anche elementi di rinforzo verticali.

La realizzazione di una struttura simile permette il mantenimento dell'edificio originario riqualificandolo da un punto di vista strutturale (miglioramento sismico e statico), energetico (aumento efficienza termica ed energetica) e formale (incremento del pregio architettonico). L'obiettivo consiste nel realizzare una struttura esterna che ne aumenti la rigidezza. Coerentemente con i risultati ottenuti, la tipologia di esoscheletro adottata permette di abbattere gli spostamenti sia per lo stato limite di danno (SLD) che per quello di salvaguardia della vita (SLV). Si ottiene per lo SLD una riduzione del 64% lungo x e del 48% lungo y; per lo SLV la riduzione è invece del 69% lungo x e del 54% lungo y.

Un'ulteriore conseguenza derivante dall'aumento della rigidezza in seguito alla realizzazione dell'esoscheletro è l'aumento dell'azione del taglio alla base. Rispetto alla sola struttura isolata, alla base della struttura si registra un'azione di taglio maggiorata. Tale azione incrementata andrà a suddividersi in parte sulla struttura originaria e in parte sull'esoscheletro. Si vuole scaricare l'edificio originario attribuendo uno sforzo maggiore all'esoscheletro esterno. Tutto ciò risulta coerente con quanto atteso dall'esecuzione della seguente operazione. Infatti, lo studio è volto a realizzare una struttura esterna che assolva al compito di adeguamento statico e sismico assorbendo le varie azioni agenti ed evitando che queste vadano a gravare sull'edificio esistente o sulle fondazioni.

In conclusione, la realizzazione di una struttura autoportante esterna produce dei benefici notevoli per l'ambiente e la popolazione. L'operazione di costruzione di tale opera nasce dalla caratteristica di essere poco invasiva: non vi è la necessità di ricollocare gli inquilini durante le fasi di costruzione. Inoltre, contrariamente alle operazioni di demolizione e ricostruzione, le cui tempistiche sono abbastanza lunghe (anni), le operazioni di riqualificazione sono molto più rapide da eseguire (pochi mesi).

7.1 Sviluppi futuri

Da quanto emerso dai risultati questo studio vuole proporre un *modus operandi* per la riqualificazione sostenibile di strutture in cemento armato che hanno superato la propria vita nominale. Se tale soluzione fosse applicata su vasta scala si potrebbe restaurare il patrimonio edilizio ormai degradato, aumentando al tempo stesso la qualità della vita.

La soluzione proposta non è però univoca: si possono adottare configurazioni strutturali dell'esoscheletro differenti, si possono variare le sezioni dei profili o utilizzare altre tipologie di collegamento. Il presente studio è riferito ad un edificio a torre isolato; in contesti urbani

densamente costruiti, in cui le costruzioni sono addossati le une alle altre, se ne dovrebbe valutare il difficile inserimento architettonico in un tessuto urbano compatto oltre alle differenti sfide del progetto strutturale. Il fenomeno noto come martellamento, condizione distruttiva che si innesca durante un evento sismico nel caso di edifici contigui che oscillano con periodi differenti, potrebbe essere un interessante spunto di futura indagine.

L'operazione eseguita inoltre non si esaurisce al solo atto della riqualificazione sismica. Come detto, infatti, ulteriori vantaggi derivanti dalla realizzazione dell'esoscheletro sono l'upgrade energetico, il miglioramento impiantistico e la riqualificazione architettonica. Questi aspetti saranno approfonditi dallo studente di architettura Emanuele Tomatis, con il quale si è collaborato nella definizione della tipologia di intervento: il suo lavoro, infatti, partendo dalle conclusioni della presente tesi e dai risultati della verifica sul modello strutturale, verterà sullo sviluppo di una soluzione riguardante il comportamento del nuovo involucro. Avvolgendo l'edificio mediante la metodologia additiva, propria dell'approccio progettuale in oggetto, è possibile dare una promettente risposta al problema architettonico presentato dall'adeguamento di manufatti esistenti. Grazie alla possibile applicazione di sistemi di costruzione leggeri a secco ed all'azione dall'esterno, si potrebbe garantire il rispetto del principio di reversibilità, come costante dell'approccio contemporaneo all'intervento sul costruito. In quanto adattivo, inoltre, l'esoscheletro è anche espediente per adeguare l'edificio al suo contesto ambientale, applicando un paradigma di progettazione più recente del caso studio stesso, di stampo razionalista, e dunque non contemplato dal disegno originario. Si vuole realizzare una seconda pelle applicata all'edificio, che garantisca un comportamento fisico pari allo stato dell'arte, caratterizzato secondo le normative vigenti. Saranno poi prefigurati alcuni scenari di integrazione impiantistica, al fine di proporre una soluzione dotata anche di una flessibilità planimetrica e funzionale al passo con i tempi.

Bibliografia

- [1] ISO, "Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework," *Iso 14040 2006 Int. Organ. Stand.*, 2006.
- [2] ISO, "Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines," *Iso 14044 2018 Int. Organ. Stand.*, 2018.
- [3] "Valutazione del ciclo vita." [Online]. Available: <https://www.solidworks.it/sustainability/life-cycle-assessment.htm>.
- [4] B. J. Guinée *et al.*, "Life Cycle Assessment: Past, Present, Future," *Encycl. Toxicol. Third Ed.*, 2010.
- [5] W. Klöpffer, "The role of SETAC in the development of LCA," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 11, pp. 116–122, 2006.
- [6] Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2007 The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, 2007.
- [7] "Valutazione LCA degli edifici." [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Valutazione_LCA_degli_edifici.
- [8] F. Feroldi *et al.*, "Miglioramento e adeguamento sismico di edifici contemporanei mediante approccio integrato energetico, architettonico e strutturale con soluzioni a doppio involucro a minimo impatto ambientale," 2014.
- [9] A. Marini, C. Passoni, P. Riva, P. Negro, E. Romano, and F. Taucer, *Technology options for earthquake resistant, eco-efficient buildings in Europe : Research needs*. 2014.
- [10] "Rassegna stampa del 01/06/2012," *G. della Prot. Civ.*, 2012.
- [11] JCR Joint Research Center, "Best environmental management practice for the building and construction sector," *Sect. Ref. Doc. Best Environ. Manag. Pract. - EMAS*, 2012.
- [12] European Construction Technology Platform, "Strategic Research Agenda for the European Underground Construction," *Undergr. Constr.*, 2005.
- [13] Il Parlamento e il Consiglio dell'Unione Europea, *Direttiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo e Consiglio del 19 novembre 2008 relativa ai rifiuti e che abroga alcune direttive*. 2008.

- [14] Repubblica Italiana, *Decreto Legislativo 3 dicembre 2010, n. 205 "Disposizioni di attuazione della direttiva 2008/98/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 novembre 2008 relativa ai rifiuti e che abroga alcune direttive."* 2010.
- [15] Ministero dell'Ambiente e della tutela del Territorio, *Decreto Ministeriale 8 maggio 2003, n. 203 "Norme affinché gli uffici pubblici e le società a prevalente capitale pubblico coprano il fabbisogno annuale di manufatti e beni con una quota di prodotti ottenuti da materiale riciclato nella misura non inferiore."* 2003.
- [16] "Riciclo dei materiali da edilizia," *Sole 24 Ore*. [Online]. Available: <http://www.ediliziaeterritorio.ilsole24ore.com/art/ambiente-e-trasporti/2015-11-03/riciclo-materiali-demolizione-italia-solo-10percento-ma-2020-bisogna-arrivare-70-201023.php?uuid=ACDdLsSB>.
- [17] LEGAMBIENTE, "Recycle: la sfida nel settore delle costruzioni," 2015.
- [18] G. Libert, *Le Case INA di Corso Sebastopoli 1957-2017. Sessant'anni di vita nella periferia torinese. Storia e testimonianze*, 1st ed. Torino, 2017.
- [19] M. Goedkoop, M. Oele, J. Leijting, T. Ponsioen, and E. Meijer, "Introduction to LCA with SimaPro," 2016.
- [20] L. Adella, C. Mariotta, G. Aragona, I. Lupica, and L. Muto, "Rapporto rifiuti speciali," 2019.
- [21] La Commissione Europea, *Decisione della commissione del 18 dicembre 2014 che modifica la decisione 2000/532/CE relativa all'elenco dei rifiuti ai sensi della direttiva 2008/98/CE del Parlamento europeo e del Consiglio*. 2014.
- [22] Repubblica Italiana, *Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152 "Norme in materia ambientale."* 2006.
- [23] J. Johnson, B. K. Reck, T. Wang, and T. E. Graedel, "The energy benefit of stainless steel recycling," 2008.
- [24] J. Morris, "Recycling versus incineration: An energy conservation analysis," *J. Hazard. Mater.*, vol. 47, no. 1-3, pp. 277-293, 1996.
- [25] M. Quattrone, S. C. Angulo, and V. M. John, "Energy and CO2 from high performance recycled aggregate production," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 90, pp. 21-33, 2014.
- [26] European Commission, "Market uptake of an automated technology for reusing old bricks (REBRICK)," pp. 16-18, 2013.

- [27] W. Gao, T. Ariyama, T. Ojima, and A. Meier, "Energy impacts of recycling disassembly material in residential buildings," *Energy Build.*, vol. 33, no. 6, pp. 553–562, 2001.
- [28] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, *Norme tecnica delle costruzioni*. 2018.
- [29] European Commission Joint Research Centre, "Characterisation factors of the ILCD Recommended Life Cycle Impact Assessment methods," 2012.
- [30] M. Huijbregts *et al.*, "ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization," *Natl. Inst. Public Heal. Environ.*, p. 194, 2016.
- [31] "Riscaldamento globale." [Online]. Available: <http://www.leparisien.fr/environnement/le-rechauffement-climatique-sera-beaucoup-plus-fort-que-prevu-17-09-2019-8153628.php>.
- [32] D. W. Fahey, "Twenty Questions and Answers About the Ozone Layer," pp. 24–28, 2002.
- [33] M. Goedkoop, R. Heijungs, M. Huijbregts, A. De Schryver, J. Struijs, and R. Van Zelm, "ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level," *Natl. Inst. Public Heal. Environ.*, 2008.
- [34] "Agenzia internazionale per la ricerca sul cancro." [Online]. Available: <http://www.inchem.org/pages/iarc.html>. [Accessed: 28-Oct-2019].
- [35] WHO Working Group, "Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide," *World Heal. Organ.*, 2003.
- [36] World Health Organisation, "Health risks of particulate matter from long-range transboundary air pollution," 2006.
- [37] R. Frischknecht, A. Braunschweig, P. Hofstetter, and P. Suter, "Human health damages due to ionising radiation in life cycle impact assessment," *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 20, no. 2, pp. 159–189, 2000.
- [38] L. B. Azevedo, R. Van Zelm, A. J. Hendriks, R. Bobbink, and M. A. J. Huijbregts, "Global assessment of the effects of terrestrial acidification on plant species richness," *Environ. Pollut.*, vol. 174, pp. 10–15, 2013.
- [39] P. O. Roy, L. Deschênes, and M. Margni, "Life cycle impact assessment of terrestrial acidification: Modeling spatially explicit soil sensitivity at the global scale," *Environ. Sci.*

- Technol.*, vol. 46, no. 15, pp. 8270–8278, 2012.
- [40] R. Van Zelm *et al.*, “Time horizon dependent characterization factors for acidification in life-cycle assessment based on forest plant species occurrence in Europe,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 41, no. 3, pp. 922–927, 2007.
- [41] M. D. M. Vieira, T. C. Ponsioen, M. J. Goedkoop, and M. A. J. Huijbregts, “Surplus cost potential as a life cycle impact indicator for metal extraction,” *Resources*, vol. 5, no. 1, 2016.
- [42] C. Thormark, “Environmental analysis of a building with reused building materials,” *Int. J. Low Energy Sustain. Build.*, vol. 1, 2000.
- [43] G. Badinio and G. A. Blengini, “The role of LCA to assess environmental performances of mineral construction materials production in Portugal and in Italy,” *Geam. Geoinf. Ambient. E Mineraria*, vol. 112, no. 1, pp. 55–55, 2004.
- [44] C. Knoeri, E. Sanyé-Mengual, and H. J. Althaus, “Comparative LCA of recycled and conventional concrete for structural applications,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 18, no. 5, pp. 909–918, 2013.
- [45] C. Broadbent, “Steel’s recyclability: demonstrating the benefits of recycling steel to achieve a circular economy,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 21, no. 11, pp. 1658–1665, 2016.
- [46] D. Burchart-Korol, “Life cycle assessment of steel production in Poland: A case study,” *J. Clean. Prod.*, vol. 54, pp. 235–243, 2013.
- [47] G. Wassermann, E. Binner, P. Mostbauer, and S. Salhofer, “Environmental Relevance of Landfills Depending on Different Waste Management Strategies,” no. October, 2005.
- [48] O. E. Bellini, A. Marini, and C. Passoni, “Adaptive exoskeleton systems for the resilience of the built environment,” *Techne*, vol. 15, pp. 71–80, 2018.
- [49] “John Hancock Center.” [Online]. Available: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/97/John_Hancock_Center.jpg.
- [50] K. S. Moon, “Comparative evaluation of structural systems for tapered tall buildings,” *Buildings*, vol. 8, no. 8, 2018.
- [51] “Hearst Tower.” [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Hearst_Tower.

- [52] K. S. Moon, "Dynamic interrelationship between the evolution of structural systems and façade design in tall buildings: From the Home Insurance Building in Chicago to the Present," *Int. J. High-Rise Build.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–16, 2018.
- [53] L. Martelli, "L'esoscheletro come approccio metodologico per l' adeguamento sismico di costruzioni esistenti," 2018.

Ringrazio

Mamma e papà senza i quali tutto questo sarebbe solo un sogno. Non conosco il mio futuro ma se diventerò qualcuno sarò solo grazie a voi.

Il Prof. Giuseppe Ferro per l'opportunità concessami di studiare una problematica reale realizzando una simulazione pratica; le correlatrici Luciana Restuccia, Esperanza Batuecas, e Lucrezia Martelli che, nonostante i molti impegni, mi hanno accompagnato durante questo percorso guidandomi e consigliandomi.

Tom, con cui ho collaborato per lo sviluppo iniziale del progetto, che mi ha mostrato cosa sia il lato oscuro dell'architettura.

Mia sorella Daniela che mi ha sempre fatto da supporto, morale e non, alla quale voglio bene anche se lo dirò un'unica volta nella vita, qui. Nicola new entry della famiglia.

Zia Paola e zia Carmela, che mi hanno amato come se fossi un figlio. Ai nonni presenti, e a quelli che non sono più con me, un sentito ringraziamento per avermi insegnato il rispetto e a perseverare nelle mie convinzioni, nella speranza di non finire in galera ...che poi chi glielo spiega a nonna... Un pensiero speciale va a Grazia che mi ha sempre confortato e incoraggiato in questo percorso universitario. I miei cugini Alessia e Andrea che, nonostante la distanza, mi sono stati vicini; tutti gli zii, le zie e tutta la mia grande famiglia per essere stati sempre presenti.

Paolo che mi è sempre stato vicino in questi anni e non mi ha mai negato il suo aiuto.

Giorgio, Andrea, Nicola e Damiano che hanno sempre creduto in me. Un ringraziamento speciale va a tutti gli amici di Alghero con cui ho vissuto in questi anni; Matteo che ha sofferto più di tutti vivendo con me dandomi sempre il suo sostegno; Riccardo l'uomo dei video che ha sempre qualcosa di interessante da mostrare; Roberto e Dario che mi hanno sempre tirato su di morale e Bizio che per ultimo ha sperimentato il brivido della convivenza con me.

Un ringraziamento speciale va a Francesco, correlatore non ufficiale, che nonostante tutti gli insulti è sempre stato disponibile. Giulia, Salvatore e Alessandra che hanno saputo rendere questa vita universitaria meno noiosa e Fabio, Pietro, Egle, Peppe, Giampiero, Melissa, Sara e Maicol amici e colleghi conosciuti nel corso dei miei studi, che hanno partecipato alla costruzione di questo momento.

Ed infine me stesso per non aver mollato nei momenti di crisi, e fidatevi, ci ho pensato spesso.

*“Ci vogliono 20 anni per costruirsi una reputazione e 5 minuti per rovinarla.
Se pensi a questo farai le cose in modo diverso”*

Warren Buffet