

consulta il dossier sull'efficienza energetica

[Home](#)

Verso una “sostenibilità programmata”: valutazioni LCA e LCC per la progettazione di coperture piane

👤 Maurizio Nicoletta - Professore nell'Università degli Studi di Napoli Federico II 👤 Filomena De Falco - Ingegnere © 29/03/2018 👁 747

Le sempre più chiare e pressanti indicazioni normative spingono i progettisti verso scelte più consapevoli sia in termini di sostenibilità, sia nei riguardi degli aspetti economici, che prendano però in considerazione tutte le fasi del ciclo di vita.

Attraverso una valutazione comparativa effettuata con l'ausilio delle note metodologie di Life Cycle Assessment e Life Cycle Costing, è possibile individuare, fra le diverse tipologie di componenti e di sistemi costruttivi, quelli che presentino un minor impatto sull'ambiente e che siano maggiormente sostenibili anche dal punto di vista economico, grazie a più appropriate strategie manutentive.

Anche l'analisi condotta con riguardo ad una semplice copertura piana da adeguare termicamente presenta spunti di interesse e di approfondimento a questa problematica rispetto alla quale troppo spesso si operano scelte non adeguate.

Il Magazine

[Sfoggia la rivista online](#)

Verso una “sostenibilità programmata”: valutazioni LCA e LCC per la progettazione di coperture piane

AUTORI: Maurizio Nicoletta, Professore nell'Università degli Studi di Napoli Federico II; Filomena De Falco, ingegnere.

ABSTRACT

Le sempre più chiare e pressanti indicazioni normative spingono i progettisti verso scelte più consapevoli sia in termini di sostenibilità, sia nei riguardi degli aspetti economici, che prendano però in considerazione tutte le fasi del ciclo di vita.

Attraverso una valutazione comparativa effettuata con l'ausilio delle note metodologie di Life Cycle Assessment e Life Cycle Costing, è possibile individuare, fra le diverse tipologie di componenti e di sistemi costruttivi, quelli che presentino un minor impatto sull'ambiente e che siano maggiormente sostenibili anche dal punto di vista economico, grazie a più appropriate strategie manutentive.

Anche l'analisi condotta con riguardo ad una semplice copertura piana da adeguare termicamente presenta spunti di interesse e di approfondimento a questa problematica rispetto alla quale troppo spesso si operano scelte non adeguate.

IL QUADRO NORMATIVO

Il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, ha approvato con il Decreto Interministeriale 11 aprile 2008 (G.U n. 107 dell'8 maggio 2008), un “Piano d'azione per la sostenibilità ambientale dei consumi della pubblica amministrazione” (PAN GPP).

La definizione ufficiale di *Green Public Procurement* cui fa riferimento la Commissione Europea è la seguente: “Il GPP è l'approccio in base al quale le Amministrazioni Pubbliche integrano i criteri ambientali in tutte le fasi del processo di acquisto, incoraggiando la diffusione di tecnologie ambientali e lo sviluppo di prodotti validi sotto il profilo ambientale, attraverso la ricerca e la scelta dei risultati e delle soluzioni che hanno il minore impatto possibile sull'ambiente lungo l'intero ciclo di vita”.

L'obiettivo del GPP consiste nella diffusione di un mercato capace di salvaguardare l'ambiente e di razionalizzare la spesa pubblica, favorendo – mediante la valutazione del ciclo di vita (approccio LCA – *Life Cycle Assessment*) e del costo globale (approccio LCC – *Life Cycle Cost*) il raggiungimento degli obiettivi delle principali strategie europee, come quello sull'uso efficiente delle risorse e quello sull'Economia Circolare.

Il nuovo Codice Appalti – Decreto Legislativo n.50/2016 ha definito obbligatoria l'applicazione dei Criteri Ambientali Minimi (cd. “CAM”) e gli appalti verdi della Pubblica Amministrazione (di cui vi era già chiaro riferimento nel Decreto del 2008), rendendo il GPP non più uno strumento volontario ma uno strumento obbligatorio.

Attualmente è in vigore il Decreto 11 gennaio 2017 “Adozione dei criteri ambientali minimi per gli arredi per interni, per l'edilizia e per i prodotti tessili”, provvedimento che definisce i CAM da adottare per gli appalti pubblici riguardanti, fra l'altro, all'Allegato 2, l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, e la ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici.

Il D.M. introduce importanti indicazioni per le gare relative sia alle nuove costruzioni che al recupero, ed introduce altresì un chiaro riferimento ai criteri di valutazione per le offerte economicamente più vantaggiose, ed una premialità per chi prevede l'utilizzo di materiali riciclati.

APPROCCIO LIFE CYCLE THINKING

Alla base delle nuove politiche ambientali dell'Unione Europea, e quindi degli "acquisti verdi" vi è il *Life Cycle Thinking* (LCT), vale a dire un approccio innovativo e sostenibile che consente di passare dal tradizionale processo di progettazione ad una visione globale del sistema produttivo, in cui sono inclusi tutti gli impatti (ambientali, sociali ed economici) che un prodotto ha nel suo intero ciclo di vita.

Avvalersi quindi del *Life Cycle Thinking Approach* vuol dire seguire un nuovo modo di pensare che tiene conto, in fase ideativa, degli impatti prodotti a partire dall'estrazione delle materie prime fino allo smaltimento nella fase di fine vita. Un "modo di pensare a 360°" che intende l'edificio come un sistema- su cui intervenire mediante un approccio multicriteriale, che consente di compiere scelte sostenibili per il lungo termine, al fine di migliorarne le prestazioni durante tutte le fasi del ciclo di vita.

Il *Life Cycle Assessment* (LCA), il *Life Cycle Cost* (LCC), le metodologie di *footprinting* (*Water Footprint* e *Carbon Footprint*), le etichette ecologiche (Ecolabel, EPD, etc..) rientrano tra le applicazioni utili ad un approccio LCT e la continua integrazione tra le tre sfere della sostenibilità (sociale, ambientale ed economica, v. fig. 1) sta portando allo studio ed all'applicazione di ulteriori metodologie basate sul ciclo di vita.

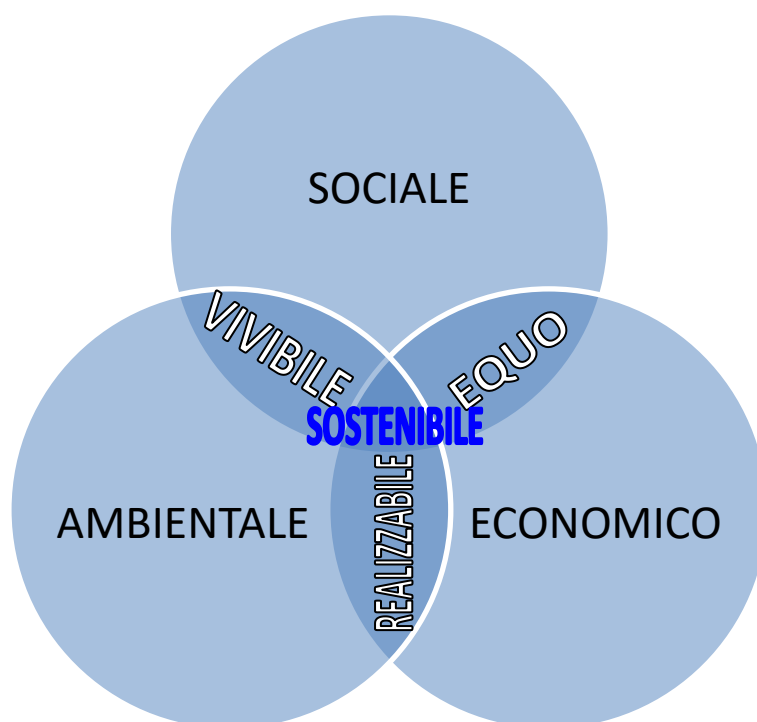


Figura 1 – Gli ambiti della sostenibilità

Avvalersi quindi del *Life Cycle Thinking Approach* vuol dire avvalersi di un nuovo modo di pensare che tiene conto, prima di poter avviare la fase di progettazione, degli impatti ambientali, sociali ed economici che entrano in gioco a partire dall'estrazione delle materie prime fino allo smaltimento nella fase di fine vita. Un "modo di pensare a 360°" che intende l'edificio come un sistema-edificio su cui intervenire mediante un approccio multicriteriale che consente di compiere scelte sostenibili per il lungo termine al fine di migliorarne le prestazioni durante tutte le fasi del ciclo di vita.

Per progettare in chiave sostenibile secondo l'approccio LCT occorre dunque perseguire, dalla fase di progettazione alla fase di dismissione, i seguenti obiettivi:

- *minimizzare l'uso delle risorse;*
- *scegliere risorse energetiche e materiali con minor impatto;*
- *ottimizzare la vita utile dell'edificio;*
- *estendere la vita dei materiali;*
- *facilitare il disassemblaggio.*

CRITERI PER LA SOSTENIBILITÀ DELLE AZIONI MANUTENTIVE

Per quanto riguarda la fase cruciale del ciclo di vita, ovvero quella alla quale sono connessi i maggiori impatti ambientali ed anche i più rilevanti oneri economici, ovvero la manutenzione, è stato giustamente osservato¹ che le premesse in termini di sostenibilità fanno sì che la manutenzione non venga più vista solo come uno strumento per garantire il “mantenimento dell'efficienza delle prestazioni offerte”, ma come uno strumento utile alla valorizzazione delle risorse esistenti.

Perseguire una manutenzione sostenibile vuol dire dunque valutare la sostenibilità dell'intervento manutentivo nel “tempo”, ovvero dalla fase di pianificazione alla fase di dismissione.

E' allora necessario, già in fase pianificazione dell'intervento manutentivo, privilegiare materiali e componenti caratterizzati da affidabilità, durabilità, riparabilità, sostituibilità e facilmente riutilizzabili o riciclabili in fase di dismissione, così da consentire la minimizzazione sia del consumo delle risorse non rinnovabili sia degli sprechi e dei rifiuti.

I criteri alla base della sostenibilità delle azioni manutentive possono essere così sintetizzati:

- *salvaguardare l'equilibrio dell'ecosistema, riducendo le emissioni di sostanze nocive ed il consumo di risorse non rinnovabili;*
- *garantire condizioni di benessere e di sicurezza agli utenti e stimolarne la partecipazione ai processi decisionali;*
- *ottimizzare le risorse finanziarie disponibili, attraverso strategie fondate su un'attenta analisi dei costi e degli impatti economici in ogni fase dell'attività manutentiva;*
- *tutelare e valorizzare l'identità del patrimonio naturale e costruito, con attività manutentive “responsabili”.*

LIFE CYCLE ASSESSMENT

La norma UNI EN ISO 14040:2006 definisce la LCA come uno strumento per la “*compilazione e valutazione attraverso tutto il ciclo di vita dei flussi in entrata ed uscita, nonché i potenziali impatti ambientali, di un sistema di prodotto*”, e suddivide la metodologia LCA in 4 fasi di lavoro:

- *Goal and Scope Definition* - definizione degli obiettivi e dei confini del sistema.
- *Life Cycle Inventory* – compilazione dell'inventario con i flussi in entrata (input) e in uscita dal sistema analizzato (output).
- *Life Cycle Impact Assessment* – valutazione degli impatti ambientali.
- *Life Cycle Interpretation* – analisi critica dei risultati e formulazione di eventuali strategie di intervento.

L'applicazione dell'analisi LCA al settore edilizio consente di poter valutare la sostenibilità di soluzioni progettuali costruttive, manutentive e di demolizione.

¹ PINTO M.R., *Procedure e strumenti innovativi per la gestione e manutenzione degli edifici*, in Landolfo R., Losasso M.R., Pinto M.R. (a cura di), *Innovazione sostenibilità negli interventi di riqualificazione edilizia*, Alinea, 2013.

L'obiettivo consiste nel passare dal modello progettuale lineare utilizzato attualmente, che prevede un continuo consumo di materie prime e produzione di rifiuti, ad un modello *circolare* in grado di progettare nel rispetto delle risorse, trasformando così il "punto di arrivo" ovvero la fase di demolizione in "un punto di partenza" per altri interventi.

Valutare quindi la qualità ambientale di un progetto vuol dire includere l'intero ciclo di vita dell'edificio all'interno dell'analisi, ovvero le fasi di produzione, trasporto e posa in opera dei materiali, la loro manutenzione e sostituzione durante la fase di esercizio, nonché la loro futura dismissione. Si ottiene così un'analisi di tipo "*from cradle to grave*", dalla culla alla tomba, sempre auspicabile pur con le indubbie difficoltà, costituite, ad esempio, dalla complessità di previsione delle trasformazioni future, dalla complessità delle interazioni esterne (edificio-ambiente) e interne (fra componenti), la insufficienza dei database.

LIFE CYCLE COSTING

La *Life Cycle Cost Analysis* è un approccio metodologico che consente di determinare il costo globale di un edificio, rappresentato non solo dal costo di costruzione ma da tutte le spese che occorre sostenere nel corso della sua vita utile. In altre parole, occorre contabilizzare anche i costi relativi:

- all'attività manutentiva, ivi comprese le attività di controllo e verifica;
- ai consumi per il funzionamento;
- agli scenari di fine vita (smaltimento, riciclo, recupero/riuso) .

E' stato stimato che sul medio-lungo periodo il LCC è mediamente 5-10 volte superiore al costo di costruzione, e dunque appare indispensabile valutare i progetti e le offerte per gli appalti non sulla base del solo costo di costruzione.

Anche l'analisi *Life Cycle Cost*, dunque, può essere utilizzata per confrontare diversi scenari ed alternative, ed è per questo che il suo utilizzo cresce sempre più nell'ambito del *Green Procurement*, qualora si prediliga non il prodotto o bene con il costo minore ma il prodotto con il costo minore da sostenere dalla "culla alla tomba".

Il costo globale stimato diviene così uno strumento di supporto nella fase decisionale, utile anche nelle scelte relative all'opportunità di investire nel processo edilizio.

In particolare, l'amministrazione può utilizzare l'analisi LCC in diversi momenti della gara d'appalto:

- in fase di pianificazione: per comparare possibili soluzioni ad esigenze e necessità al fine di definire la risposta ottimale ed efficiente, non solo dal punto di vista ambientale, ma anche da quello economico;
- in fase di gara: per una più adeguata comparazione delle diverse offerte, assegnando ad esempio un punteggio più elevato alle offerte con LCC più bassi;
- in fase di monitoraggio e di valutazione ex post: per apprezzare i benefici economici derivati da una scelta ambientale piuttosto che da una non ambientale.

UN ESEMPIO APPLICATIVO

Un efficace esempio di valutazione comparativa che utilizzi analisi LCA E LCC, per valutare e confrontare l'impatto economico ed ambientale di due diversi criteri di intervento individuando la tecnologia costruttiva meno impattante attraverso un'analisi integrale del tipo "*cradle to grave*", può essere rappresentato dalla scelta della tipologia di tetto isolato termicamente, nel frequente caso di necessità di adeguamento energetico. Le valutazioni ambientali sono state condotte con l'ausilio del software SimaPro.

È stato ipotizzato l'intervento su un solaio di copertura in latero-cemento di 50 m², sprovvisto di un sistema di isolamento termico interessato all'estradosso da un avanzato stato di invecchiamento del manto impermeabilizzante (figura 2) e all'intradosso da macchie di muffa e di umidità (figura 3).



Figura 2 – condizioni di conservazione del manto impermeabile

Figura 3 – effetti della permeazione di acqua e dell'assenza di un adeguato isolamento termico

Obiettivo della LCA

In questa prima fase della *Life Cycle Assessment* sono stati definiti gli obiettivi e i confini dell'analisi.

Si sono considerate due alternative progettuali per l'adeguamento del solaio di copertura al vigente quadro normativo nazionale, ovvero un "tetto caldo" (di seguito definito "Alternativa A") ed un "tetto rovescio" (di seguito definito "Alternativa B").

È stato ipotizzato un intervento su meno del 25% della superficie disperdente lorda, rientrando così, secondo il D.M 26 Giugno 2015 "Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici", nella categoria degli interventi di riqualificazione energetica per i quali risulta obbligatoria l'applicazione dei requisiti minimi definiti nell'Allegato 1 – Appendice B. Al paragrafo 1.1 sono riportati i valori limite dei parametri caratteristici degli elementi edilizi negli edifici esistenti sottoposti a riqualificazione energetica. In particolare, per una copertura, considerando che il caso studio si trova nel comune di Pomigliano d'Arco, in provincia di Napoli, si ha:

COMUNE	ZONA CLIMATICA	GRADI GIORNO
Pomigliano d'Arco (NA)	C	1127

In base alle caratteristiche del solaio nel suo stato di partenza, come rappresentato nella figura 4, si è potuto calcolare lo spessore di isolante necessario per garantire il valore di trasmittanza di 0,34 W/m²K, valido fino al 2021.

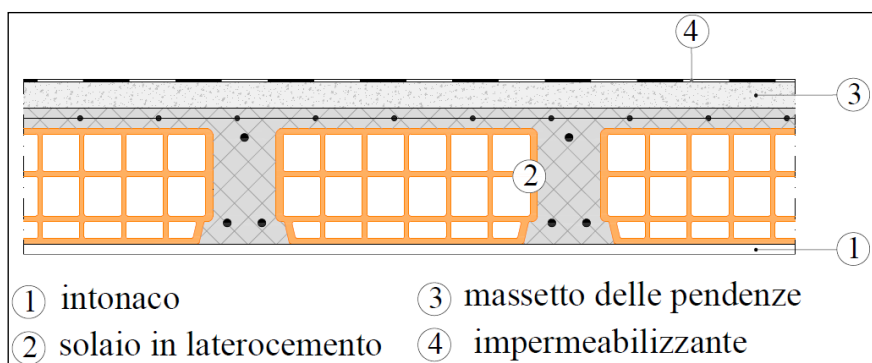


Figura 5 – stato di fatto del solaio di copertura

Alternativa A

Nell'ambito delle coperture piane, la tipologia di tetto caldo è sicuramente la più diffusa. Per quanto concerne la stratigrafia, l'alternativa A considerata contempla la stratigrafia di cui alla figura 6, con utilizzo di pannelli in polistirene espanso estruso (XPS) accoppiati tra loro per uno spessore complessivo di 8 cm, quale materiale isolante. La sua posizione sotto il manto rende necessario l'utilizzo, per lo strato più esterno, di un pannello XPS pre-accoppiato con una membrana bituminosa. La scelta di non utilizzare un unico pannello è dettata da questioni manutentive ed economiche che verranno trattate in seguito. Inoltre data l'assenza di una protezione pesante, si prevede un fissaggio meccanico, realizzato con 5 tasselli ad espansione per pannello (uno al centro e gli altri negli angoli, ad una distanza di 50 mm dai bordi).

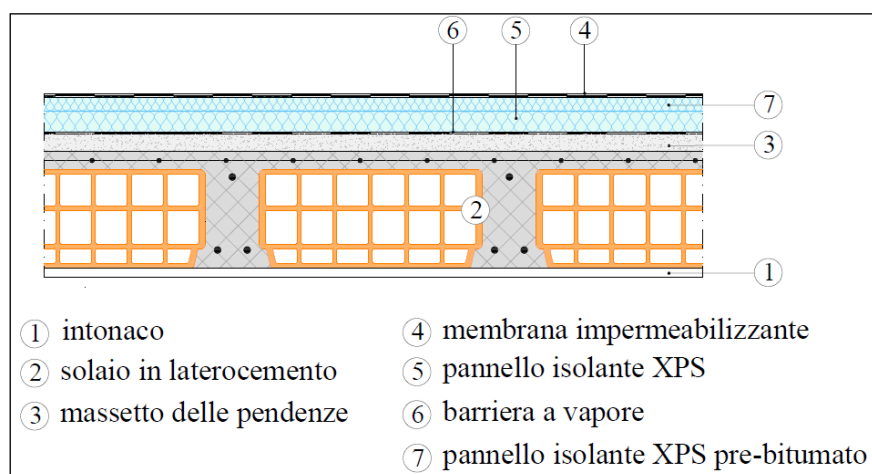


Figura 6 - stratigrafia della copertura nella soluzione "Alternativa A" (tetto caldo)

I parametri termofisici relativi ai materiali ed al solaio sono stati ricavati dalle UNI 10351 e 10355 tramite i quali si ottengono i valori indicati nella sottostante tabella:

ALTERNATIVA A – tetto caldo					
N	DESCRIZIONE STRATO	S (m)	λ (W/mK)	C (W/m ² K)	R (m ² K/W)
1	Strato liminare interno			7,70	0,1299
2	Intonaco	0,020	1,400	70,00	0,0143
3	Solaio latero-cementizio	0,260		2,86	0,3500
4	Massetto di pendenza in cls alleggerito con argilla espansa	0,050	0,500	10,10	0,1000

5	Barriera al vapore	0,002	0,170	85,00	0,0118
6	Lastra in polistirene espanso estruso	0,080	0,034	0,43	2,3529
7	Membrana impermeabilizzante bituminosa	0,008	0,260	32,50	0,0308
8	Strato liminare esterno			25,00	0,0400
Totale		0,40			3,0268
Trasmittanza termica unitaria U		0,325 W/m²K			
U limite = 0,340 W/m²K		VERIFICATO			

Alternativa B

Al contrario del tetto caldo, nel tetto rovescio si prevede il posizionamento del manto bituminoso sotto l'isolamento, anche in questo caso costituito da pannelli in polistirene espanso estruso, posato a secco (figura 7). Tale stratigrafia consente di proteggere il manto impermeabilizzante dagli sbalzi termici, mantenendolo a temperature vicine a quelle dell'elemento portante, ed inoltre permette l'eliminazione della barriera a vapore, la cui funzione è assolta direttamente dallo strato di tenuta. Per proteggere i pannelli isolanti è previsto il posizionamento di un feltro sintetico e successivamente una protezione pesante in ghiaia rotonda lavata (granulometria 16-32 mm).

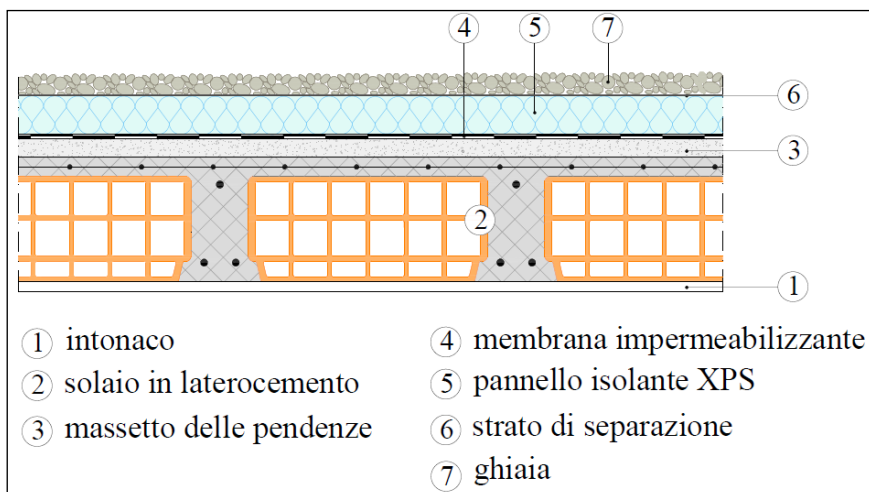


Figura 7 - stratigrafia della copertura nella soluzione "Alternativa B" (tetto rovescio)

Grazie ai parametri termofisici relativi ai materiali ed al solaio sono stati ricavati dalle UNI 10351 e 10355, ottengono i risultati riportati nella sottostante tabella:

ALTERNATIVA A – tetto caldo					
N	DESCRIZIONE STRATO	S (m)	λ (W/mK)	C (W/m²K)	R (m²K/W)
1	Strato liminare interno			7,70	0,1299
2	Intonaco	0,020	1,400	70,00	0,0143
3	Solaio latero-cementizio	0,260		2,86	0,3500
4	Massetto di pendenza in cls alleggerito con argilla espansa	0,050	0,500	10,10	0,1000
5	Membrana impermeabilizzante bituminosa	0,008	0,260	32,50	0,0308
6	Lastra in polistirene espanso estruso	0,080	0,034	0,43	2,3529
7	Ghiaia	0,050	1,200	24,00	0,0417
8	Strato liminare esterno			25,00	0,0400

Totale	0,40		3,0268
Trasmittanza termica unitaria U	0,325 W/m ² K		
U limite = 0,340 W/m ² K	VERIFICATO		

La **definizione dei confini** dei sistemi analizzati rappresenta uno *step* necessario per poter costruire i bilanci ambientali delle analisi LCA.

Le fasi del ciclo di vita delle due alternative progettuali sono state divise in quattro gruppi (v. figura 8):

- *Produzione*, che comprende le fasi di produzione fuori opera (estrazione materie prime, trasporti, produzione);
- *Esecuzione*, che comprende le fasi di esecuzione in opera (costruzione, trasporti);
- *Manutenzione*, che comprende le fasi di esecuzione innescate dai possibili interventi manutentivi (demolizione, manutenzione, trasporti, smaltimento, recupero);
- *Dismissione*, che comprende tutte le fasi di fine vita (demolizione, smaltimento, recupero).

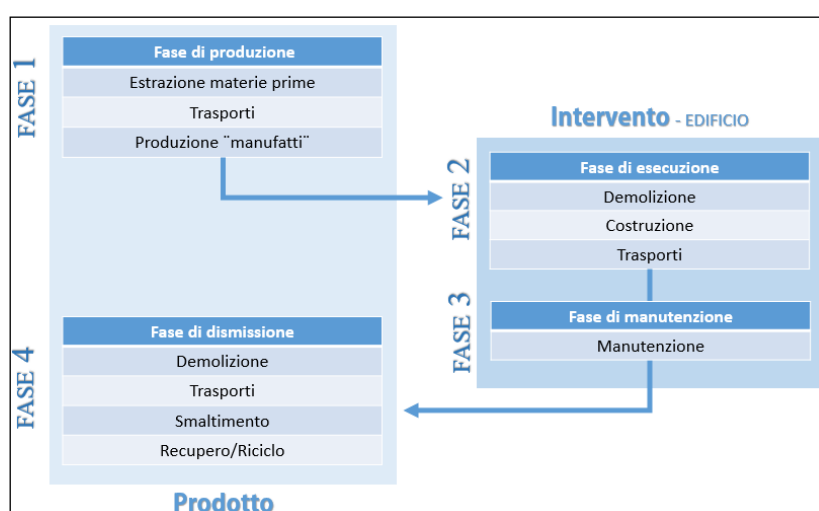


Figura 8 – Ciclo di vita dell'intervento

Analisi dell'inventario

La seconda fase della *Life Cycle Assessment* costituisce il cuore dell'analisi e consiste nella raccolta quantitativa e qualitativa dei dati riguardanti i flussi di materia ed energia in entrata e in uscita dai due sistemi. Per questo motivo è necessario associare i materiali e i processi (relativi all'energia utilizzata nel sistema costruttivo e nel sistema di trasporto), coinvolti nelle diverse fasi analizzate, ai dati presenti nei database disponibili in SimaPro.

Fase di produzione

Nelle seguenti tabelle, per ogni materiale, viene indicata la corrispondenza con le banche dati utilizzate dal software, la fonte e la quantità necessaria.

ALTERNATIVA A – Tetto caldo				
Materiale	Rif. SimaPro	Fonte	Quantità	Unità di misura
Barriera a vapore	Bitumen Sealing VA4, at plant/RES U	Ecoinvent system process	100	kg
Membrana bituminosa impermeabilizzante	Bitumen Sealing V60, at plant/RES U	Ecoinvent system process	400	Kg
Polistirene espanso	Polystyrene extruded	Ecoinvent	140	Kg

estruso	(XPS), at plant/RER U	system process		
Vernice acrilica	Acrylic varnish, 87,5% in H ₂ O, at plant/RER U	Ecoinvent system process	25	Kg
Intonaco cementizio	Base plaster, at plant/CH U	Ecoinvent system process	1500	Kg

ALTERNATIVA B – Tetto rovescio				
Materiale	Rif. SimaPro	Fonte	Quantità	Unità di misura
Polistirene espanso estruso	Polystyrene extruded (XPS), at plant/RER U	Ecoinvent system process	140	Kg
Membrana bituminosa impermeabilizzante	Bitumen Sealing V60, at plant/RES U	Ecoinvent system process	400	Kg
Ghiaia	Gravel, round, at mine/CH U	Ecoinvent system process	3000	Kg
Intonaco cementizio	Base plaster, at plant/CH U	Ecoinvent system process	1500	Kg

Fase di esecuzione

Per ridurre gli impatti ambientali dovuti al trasporto, i materiali utili agli interventi provengono da stabilimenti produttivi locali, con una scelta che ottempera ai criteri indicati nel paragrafo 2.6.5 “Distanza di approvvigionamento dei prodotti da costruzione” del D.M. 11 gennaio 2017, nel quale si richiede, per l’attribuzione del punteggio premiante, che almeno il 60% in peso dei materiali impiegati per l’intervento siano estratti, raccolti o recuperati, nonché lavorati, entro 150 km di distanza dal cantiere in cui sono messi in opera.

Nelle seguenti tabelle, viene definita per ciascun materiale la distanza dei siti produttivi dal cantiere e la tipologia di trasporto:

ALTERNATIVA A – Tetto caldo				
Materiale	Tipo di trasporto	Distanza	Azienda	Comune
Barriera a vapore	Transport, van < 3,5t/RES U	76,6 km	Prebit	Battipaglia (SA)
Membrana bituminosa impermeabilizzante	Transport, van < 3,5t/RES U	76,6 km	Prebit	Battipaglia (SA)
Polistirene espanso estruso	Transport, van < 3,5t/RES U	76,6 km	Prebit	Battipaglia (SA)
Vernice acrilica	Transport, van < 3,5t/RES U	22,4 km	Malvin	Gricignano di Aversa (CE)
Intonaco cementizio	Transport, van < 3,5t/RES U	14,7 km	CAD	Caivano (NA)

ALTERNATIVA A – Tetto caldo				
Materiale	Tipo di trasporto	Distanza	Azienda	Comune
Polistirene espanso estruso	Transport, van < 3,5t/RES U	76,6 km	Prebit	Battipaglia (SA)

Membrana bituminosa impermeabilizzante	Transport, van < 3,5t/RES U	76,6 km	Prebit	Battipaglia (SA)
Ghiaia	Transport, lorry 3,5-7,5t/RES U	15,5 km	Semac	Roccarainola (NA)
Intonaco cementizio	Transport, van < 3,5t/RES U	14,7 km	CAD	Caivano (NA)

Vanno inoltre stimati i consumi energetici connessi con l'utilizzo delle attrezzature per la demolizione degli intonaci e per il fissaggio meccanico dei pannelli XPS previsto per il tetto caldo:

Attrezzatura	Potenza (W)	Tempo (ore)	Consumo
Trapano avvitatore	570	6	3,42
Martello demolitore	1150	12	13,8

nonché il consumo d'acqua per il rifacimento degli intonaci (pari a 320 litri), ed il consumo di gas propano per la posa in opera di un solo strato di membrana bituminosa (4,5 kg/h per 2 ore = 9 kg).

Fase di manutenzione

Per l'analisi degli impatti è stata considerata una vita utile di 60 anni, per cui è stato possibile definire le cadenze temporali degli interventi manutentivi previsti per ciascuna strategia di intervento.

Le indagini condotte fino ad oggi, sulle coperture esistenti, hanno dimostrato che il concetto di durata di un manto impermeabile non va separato dal sistema in cui è inserito, dalle interazioni con gli altri strati e dalla presenza o meno di una protezione pesante in grado di proteggerlo dalla radiazione solare incidente, dalle escursioni termiche, dall'azione di vento e grandine e da altre sollecitazioni meccaniche. La durata del manto impermeabilizzante risulta essere strettamente connessa alla stratigrafia in cui viene inserito e alla corretta progettazione di quest'ultima.

Per la determinazione del ciclo di vita dei componenti, si è attinto dalla letteratura sempre più ampia nel campo della durabilità dei componenti edilizi.

I valori assunti sono i seguenti:

- 40/45 anni per il sistema di tetto rovescio
- 20/25 anni per il tetto caldo

Per le due alternative analizzate, è stato previsto l'utilizzo di membrane bituminose del tipo *non autoprotette*. La durata dell'efficienza della vernice acrilica protettiva è stata stimata in 2 anni. Il rifacimento dell'intonaco interno è stato previsto ogni 20 anni, mentre nei 60 anni non è stato previsto alcun intervento manutentivo allo strato isolante ad eccezione della sostituzione del pannello XPS preaccoppiato alla membrana bituminosa, presente nella stratigrafia del tetto caldo. Operazione necessaria per consentire il rifacimento del manto bituminoso. Risulta quindi evidente il risparmio economico ed ambientale ottenuto con la scelta di utilizzare pannelli di polistirene espanso estruso sovrapposti, nel tetto caldo.

Riassumendo, sono stati previsti nella fase di manutenzione dell'**Alternativa A** - "Tetto caldo" i seguenti interventi:

- rifacimento del manto bituminoso ogni 20 anni;
- rifacimento dell'intonaco ogni 20 anni;
- verniciatura del manto bituminoso ogni 2 anni.

Mentre per l'**Alternativa B** "tetto rovescio":

- rifacimento del manto bituminoso ogni 40 anni;
- rifacimento dell'intonaco ogni 20 anni.

I materiali demoliti a seguito degli interventi manutentivi sono stati inviati a riciclo o a discarica, secondo le seguenti percentuali:

- inerti (intonaco): 100% riciclo;
- guaina bituminosa: 100% discarica;
- pannello XPS (pre-accoppiato alla guaina bituminosa): 100 % discarica.

Fase di dismissione

Per la fase di dismissione è stata considerata una demolizione di tipo manuale e meccanico, con la conseguente separazione dei materiali e il loro carico sugli autocarri.

I materiali sono stati inviati a riciclo o a discarica, secondo le seguenti percentuali:

- inerti (intonaco, ghiaia): 100% riciclo;
- guaina bituminosa: 100% discarica;
- barriera a vapore: 100% discarica;
- pannello XPS (alternativa B) : 100 % riciclo;
- pannello XPS (alternativa A) : 52 % riciclo, 42 % discarica.

ALTERNATIVA A – Tetto caldo				
Materiale	Tipo di trasporto	Distanza	Azienda	Comune
Pannello preaccoppiato XPS - guaina	Transport, lorry 3,5-7,5t/RES U	12,0 km	Eurometal	Acerra (NA)
Membrana bituminosa impermeabilizzante	Transport, lorry 3,5-7,5t, Euro 5/RER U	24,0 km	B-Recycling	Giugliano (NA)
Intonaco cementizio	Transport, lorry 3,5-7,5t/RES U	2,8 km	Impianti & Strutture	Pomigliano d'Arco (NA)

ALTERNATIVA B – Tetto rovescio				
Materiale	Tipo di trasporto	Distanza	Azienda	Comune
Membrana bituminosa impermeabilizzante	Transport, lorry 3,5-7,5t, Euro 5/RER U	24,0 km	B-Recycling	Giugliano (NA)
Pannello preaccoppiato XPS - guaina	Transport, lorry 3,5-7,5t/RES U	12,0 km	Eurometal	Acerra (NA)
Pannello XPS	Transport, van < 3,5t, /RER U	12,0 km	Eurometal	Acerra (NA)
Intonaco cementizio	Transport, lorry 3,5-7,5t/RES U	2,8 km	Impianti & Strutture	Pomigliano d'Arco (NA)
Ghiaia	Transport, lorry 3,5-7,5t, Euro 5, RER U	2,8 km	Impianti & Strutture	Pomigliano d'Arco (NA)
Barriera a vapore	Transport, lorry	24,0 km	Impianti &	Pomigliano d'Arco

	3,5-7,5t/RES U		Strutture	(NA)
--	----------------	--	-----------	------

Valutazione degli impatti

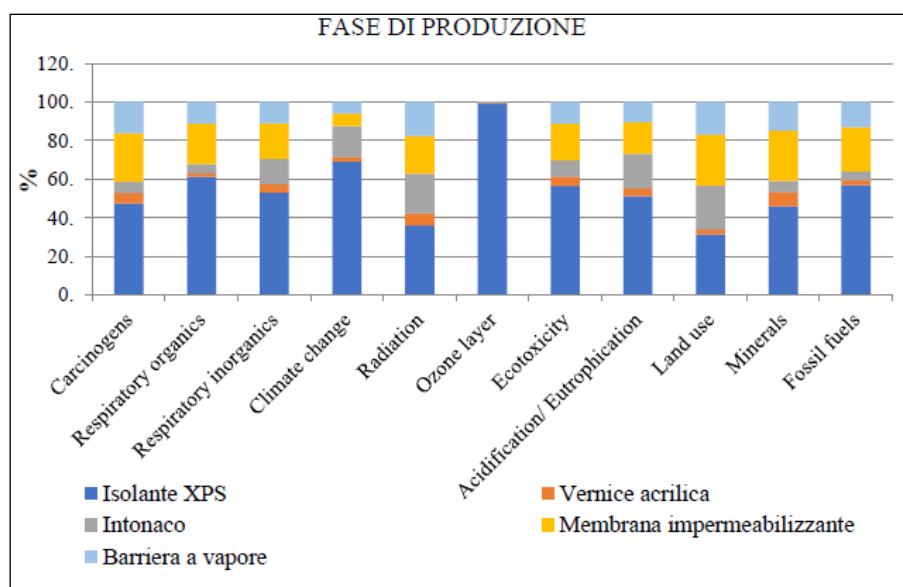
In questa fase è stata valutata la portata degli impatti ambientali provocati dalle due alternative di intervento studiate. Questa valutazione parte dai dati numerici calcolati nella fase d'inventario e consente, mediante l'ausilio di indicatori aggregati di uso internazionale, di quantificare gli impatti e di individuarne le criticità ambientali, passando quindi dal dato numerico al giudizio di pericolosità.

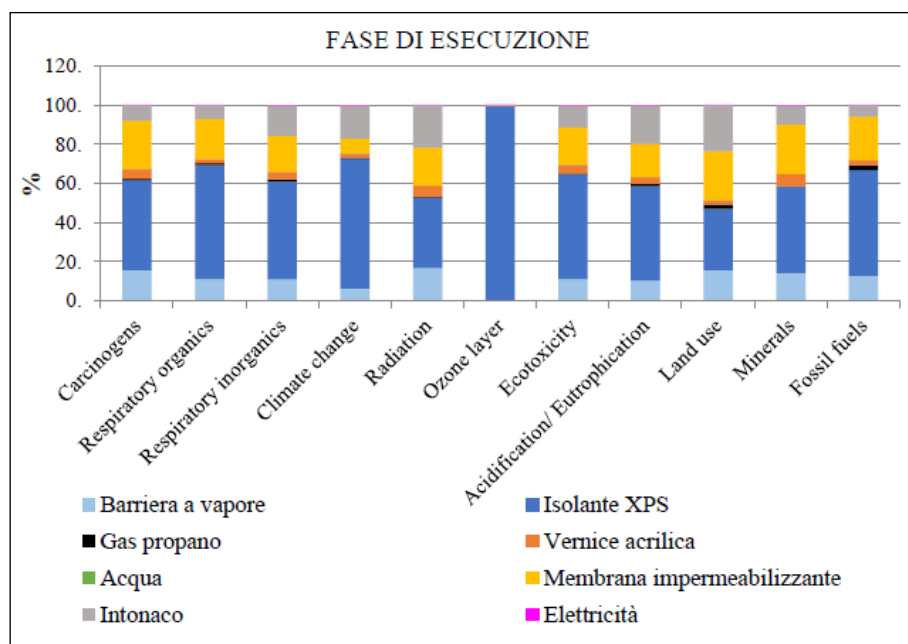
Con il metodo di valutazione *Eco-indicator 99* presente nel software SimaPro, è stato possibile associare quantitativamente tutti i consumi delle risorse e i rilasci ambientali a determinate categorie di impatto (formazione di smog fotochimico, impoverimento dell'ozono stratosferico etc..) riconducibili a loro volta a tre grandi aree di protezione generale: *Human Health*, *Ecosystem Quality* e *Resources*. I risultati ottenuti dalla pesatura di queste tre categorie di danno sono stati sommati tra loro (da Ecoindicator99) in un punteggio singolo, detto eco-indicatore (*Point* o *Millipoint*), che ha consentito quindi di quantificare l'impatto ambientale associato ai sistemi studiati.

Categorie di impatto ambientale

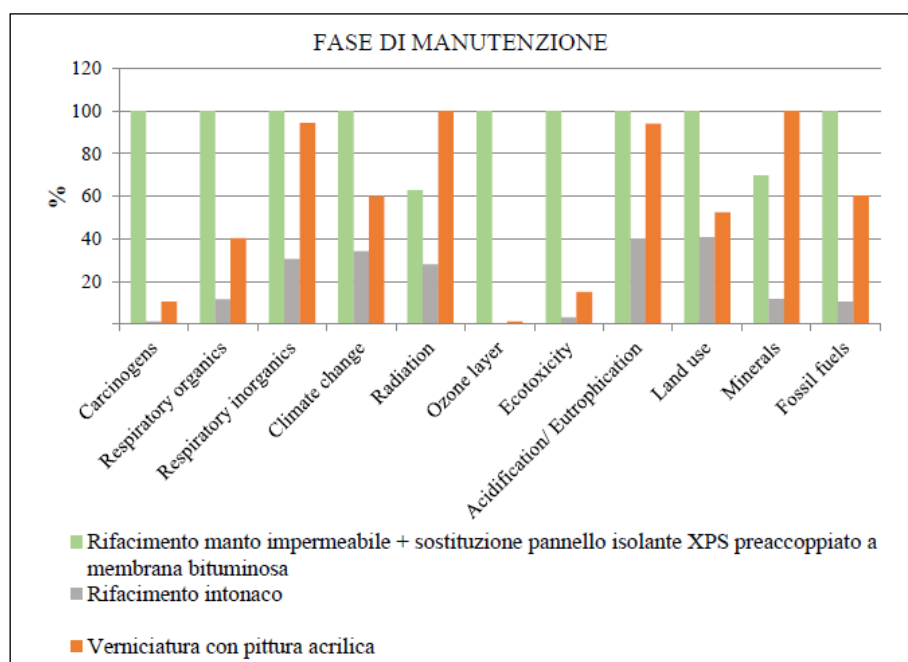
I grafici sottostanti mostrano, per ogni fase del ciclo di vita delle due alternative progettuali, la quantificazione dei danni ambientali per ciascuna categoria di impatto che compete ai materiali utilizzati.

Alternativa A

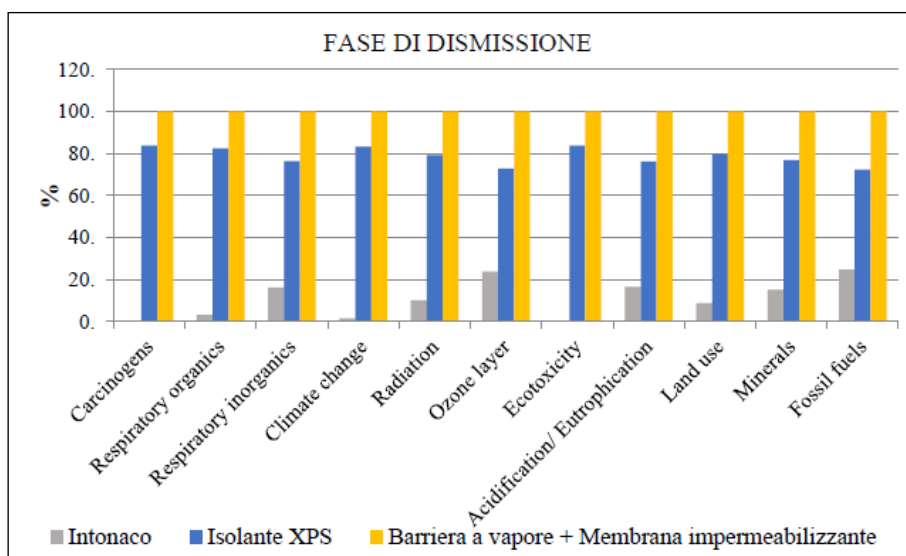




Come si può vedere, nella fase di produzione e di esecuzione, il pannello isolante determina i maggiori valori di impatto, in particolar modo in merito alla riduzione dello strato di ozono.

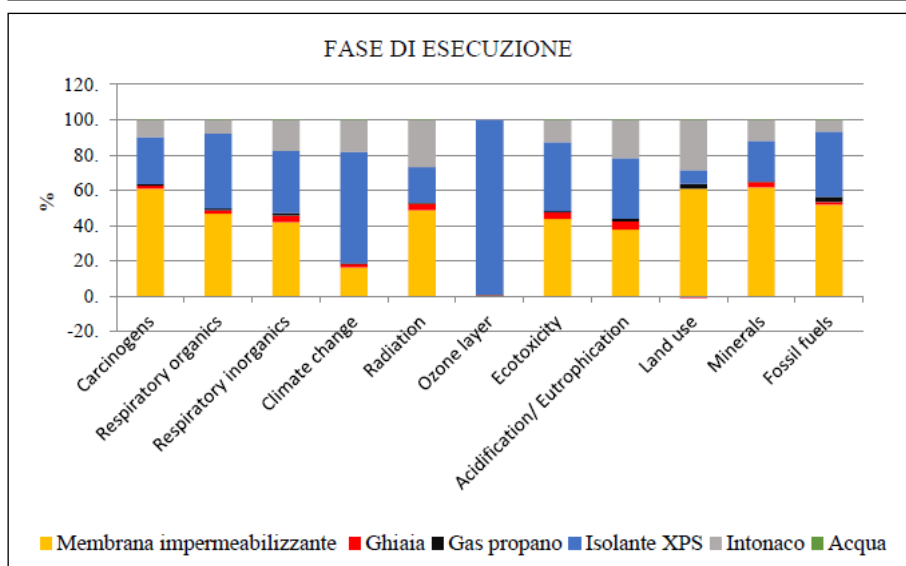
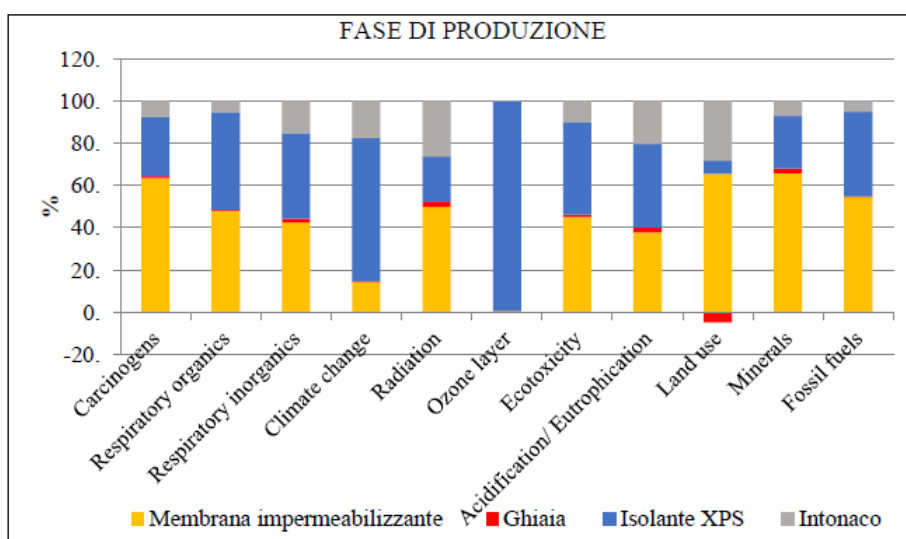


Nella fase di manutenzione i danni maggiori sono generati dall'intervento di rifacimento del manto impermeabile e dall'intervento di verniciatura con la pittura protettiva acrilica.

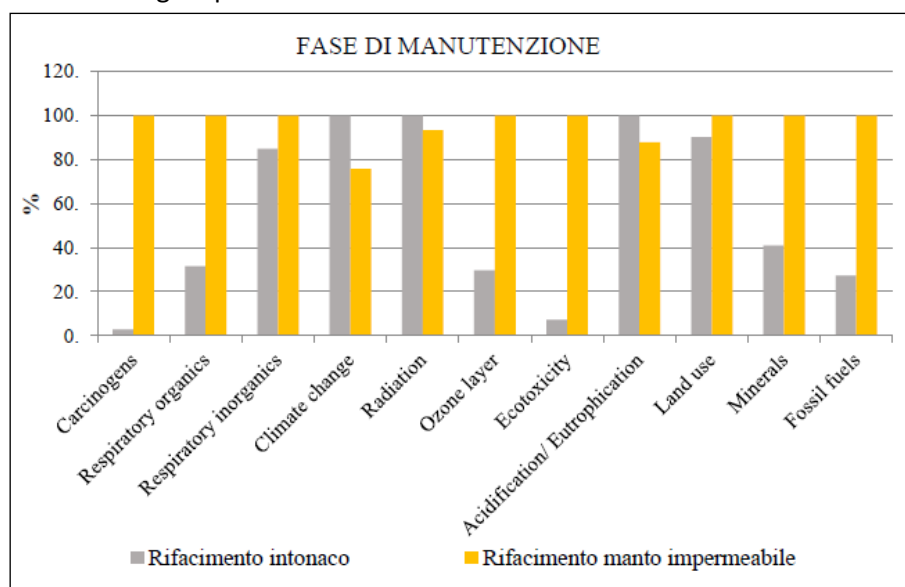


In quest'ultima fase le categorie di impatto sono influenzate in maniera rilevante dalla dismissione dei materiali non riciclabili.

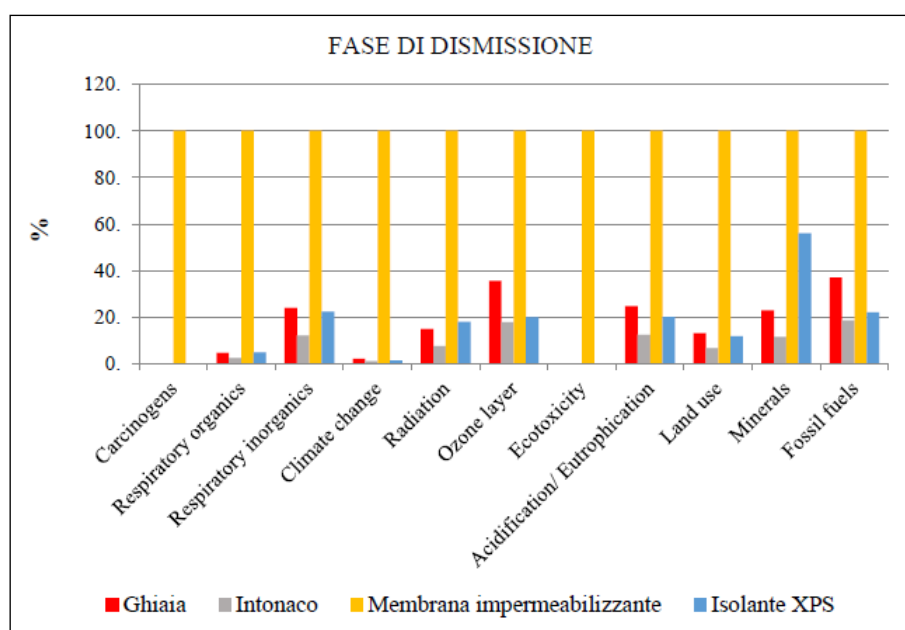
Alternativa B



Nella fase di produzione e di esecuzione del tetto rovescio i danni maggiori sono determinati dal pannello isolante in polistirene espanso estruso e dalla membrana impermeabilizzante. In particolare, l'isolante è responsabile dei danni relativi alla riduzione dello strato d'ozono e ai cambiamenti climatici, mentre la membrana di danni cancerogeni per l'uomo e dell'uso di suolo e minerali.



Come per il tetto caldo, anche in questo caso i danni maggiori sono dovuti al rifacimento del manto impermeabile.



Nella fase di dismissione tutte le categorie di impatto sono influenzate dalla membrana impermeabilizzante, dal momento che si tratta dell'unico componente non riciclabile della stratigrafia del tetto rovescio.

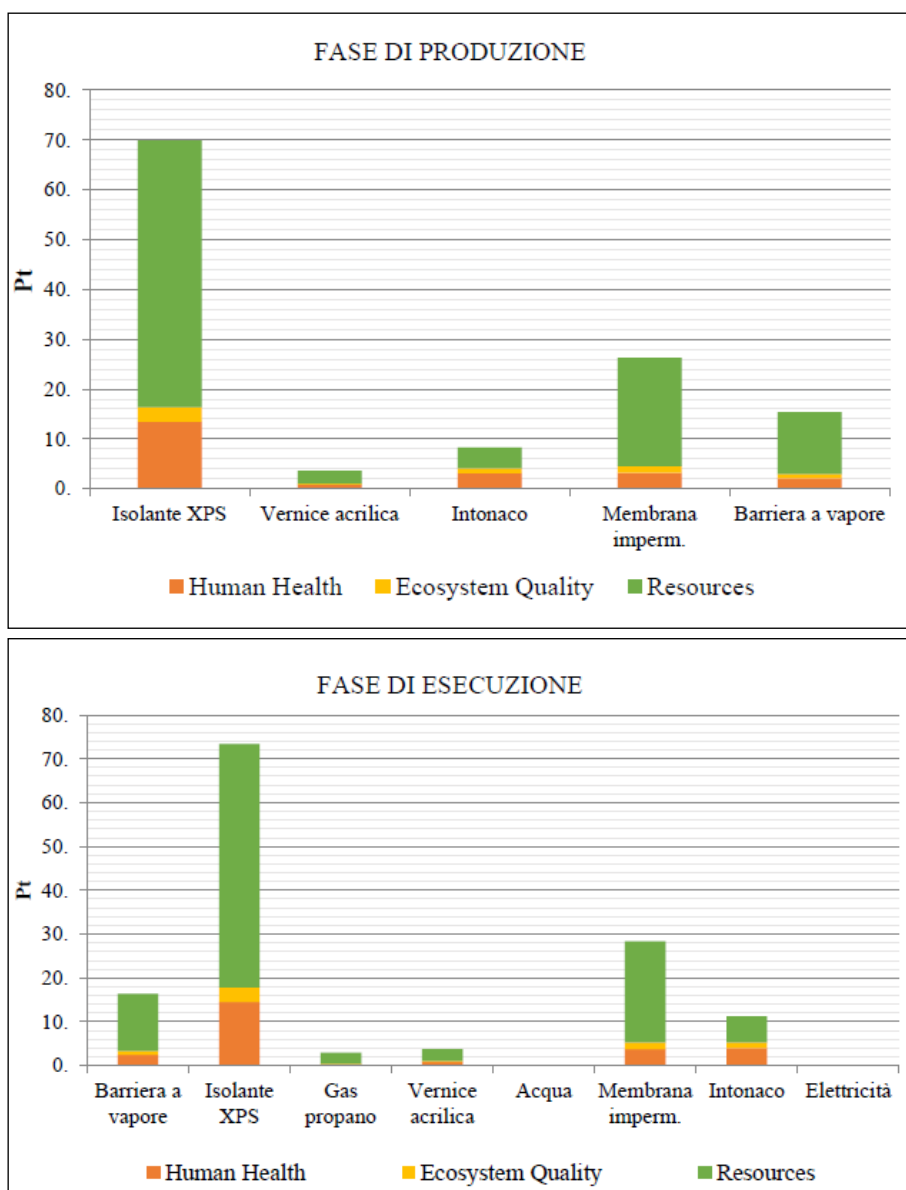
Categorie di danno ambientale

Successivamente gli impatti ambientali che competono alle due alternative progettuali sono stati ricondotti alle tre categorie di danno:

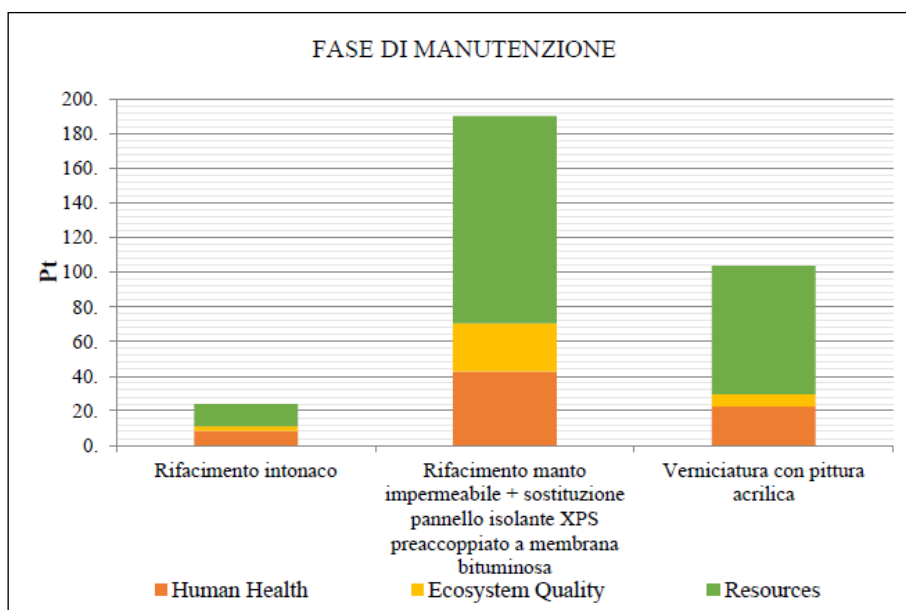
- *Human Health* (Salute Umana), misurata in DALY;
- *Ecosystem Quality*, (Qualità dell'Ecosistema), misurata in PDF*m2y;
- *Resources* (Sfruttamento delle Risorse), misurata in MJsurplus.

I risultati sono mostrati sotto forma di punteggio singolo (*Point – Pt*).

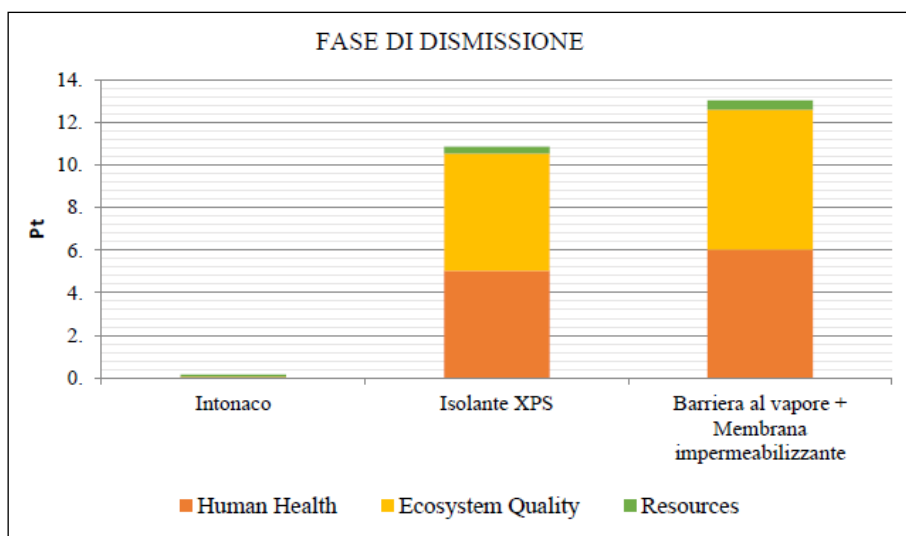
Alternativa A



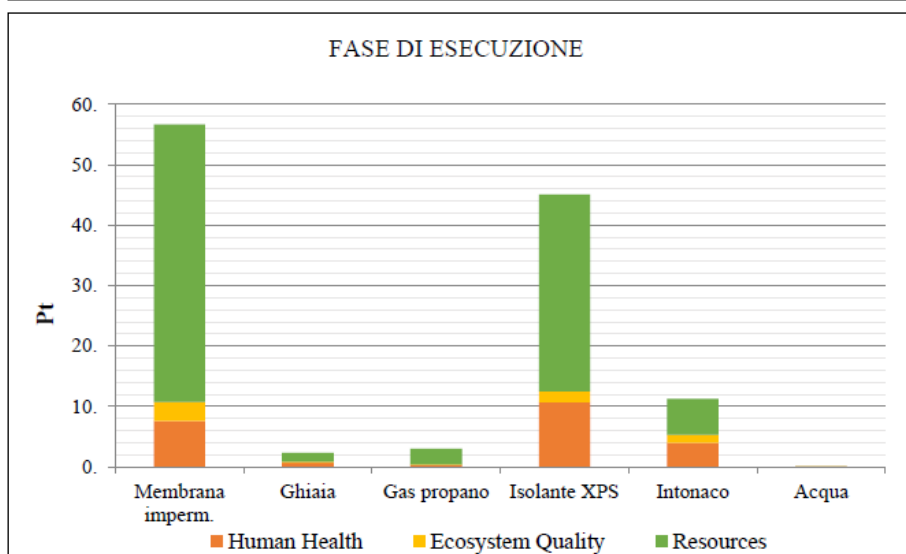
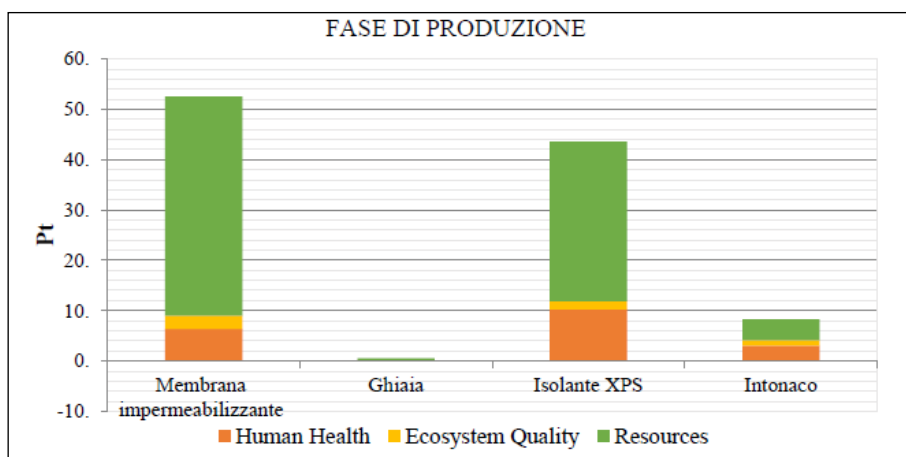
In queste due fasi lo sfruttamento delle risorse ha rappresentato la categoria di danno pi  rilevante, causata principalmente dal pannello isolante XPS, dalla membrana impermeabilizzante e dalla barriera a vapore.



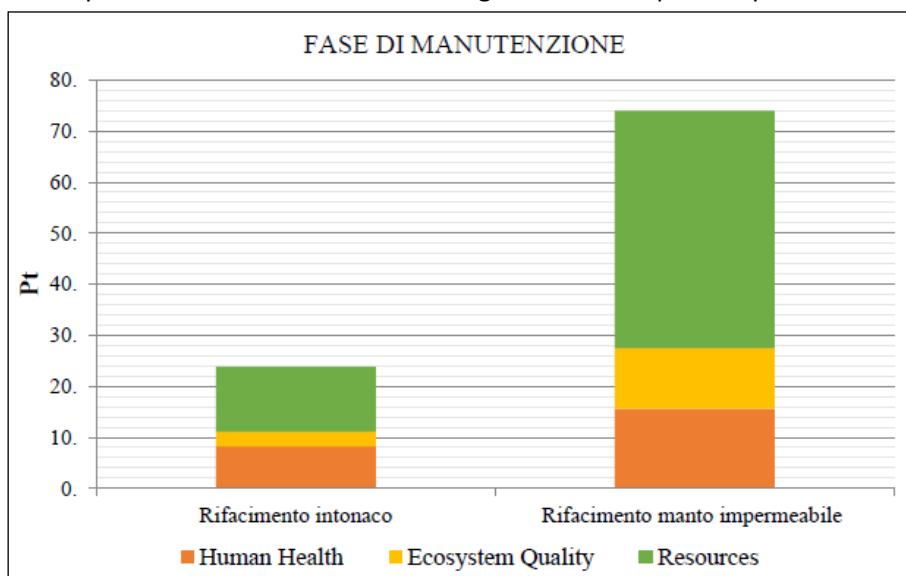
Il rifacimento e la verniciatura del manto impermeabilizzante sono risultati gli interventi di manutenzione responsabili del maggior consumo di risorse e del maggior danno alla salute umana e alla qualità dell'ecosistema. Tra le cause: l'esigenza di dover sostituire anche il pannello isolante XPS pre-bitumato, l'impossibilità di riciclare e l'elevata frequenza di utilizzo della vernice acrilica.



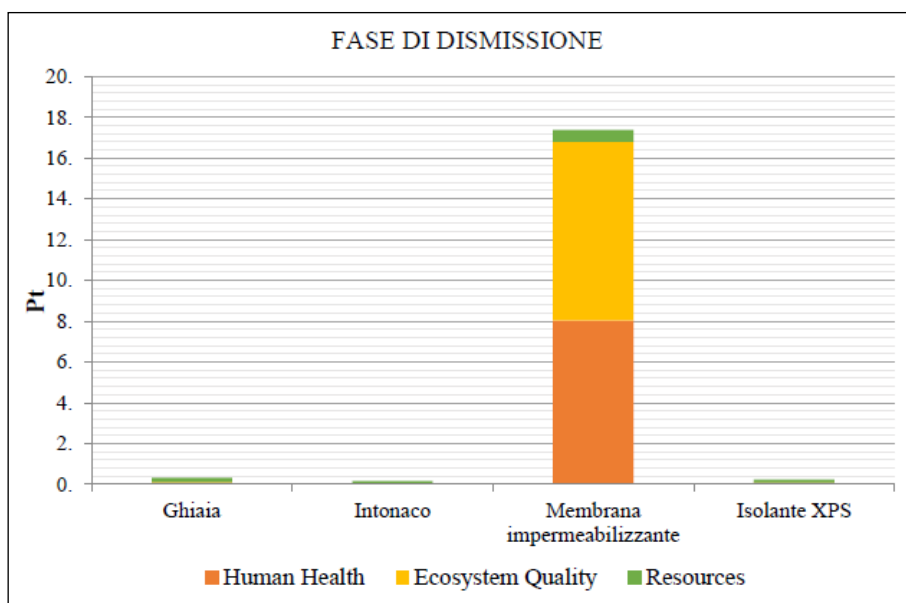
Nella fase di dismissione le categorie di danno più rilevanti sono la qualità dell'ecosistema e la salute dell'uomo: gli impatti sono determinati dal fatto che la maggior parte dei materiali utilizzati nella stratigrafia del tetto caldo termina in discarica.



La membrana impermeabilizzante ed il pannello isolante XPS sono risultati, in queste due fasi, responsabili dei maggiori danni. In particolare *Risorse* è stata la categoria di danno più compromessa.



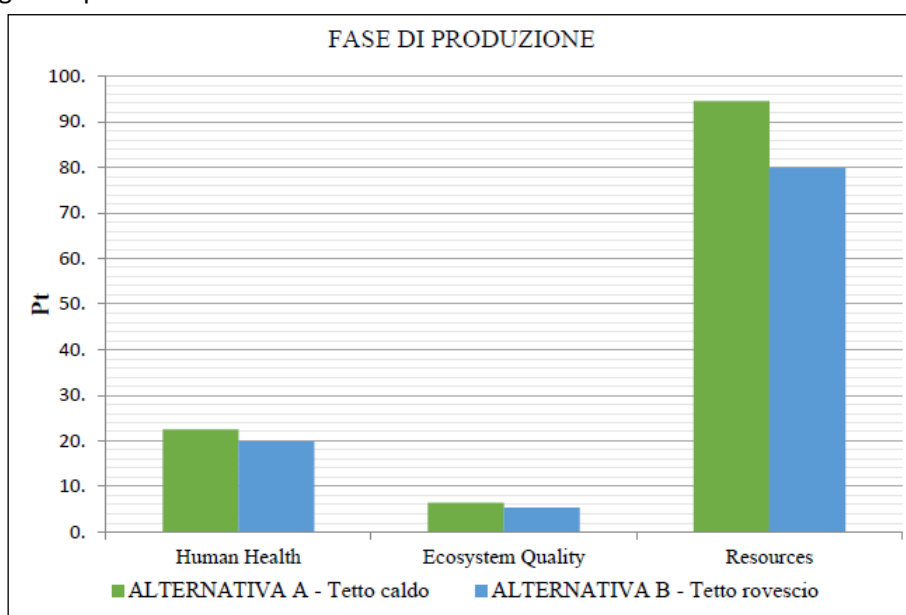
Come per l'alternativa A, il rifacimento del manto impermeabile ha rappresentato l'intervento manutentivo con il maggior impatto ambientale



Nella fase di dismissione l'impossibilità di riciclare la membrana impermeabilizzante ha determinato danni alla qualità dell'ecosistema e alla salute dell'uomo. Sono risultati invece trascurabili gli impatti dei restanti materiali.

Interpretazione

In quest'ultima fase dell'analisi LCA, è stata effettuata una valutazione comparativa tra le due alternative progettuali in funzione degli impatti ambientali quantificati nelle fasi precedenti, i cui risultati sono esposti nei grafici di seguito riportati.



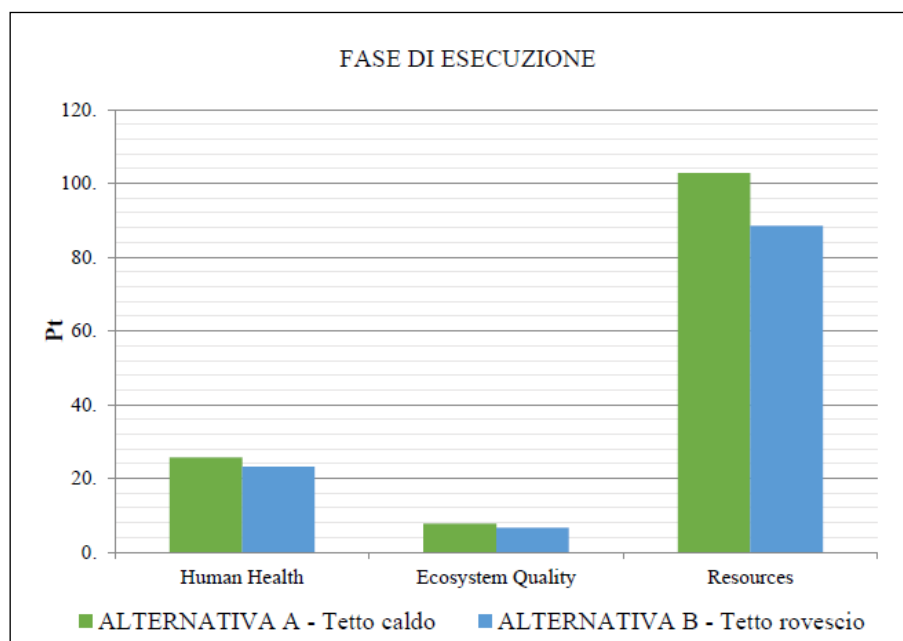
Categoria di danno	Unità	Alternativa A	Alternativa B
Human Health	Pt	22,5	19,9
Ecosystem quality	Pt	6,45	5,34
Resources	Pt	94,5	79,8
Totale	Pt	123	105

Nella fase di produzione, l'alternativa A ha presentato il maggior carico ambientale in tutte e tre le categorie di danno, con un impatto totale pari a 123 Point. Il divario più rilevante si è avuto in merito allo sfruttamento delle risorse: i 79,8 Pt dell'Alternativa B contro i 94,5 Pt dell'Alternativa A.

Categoria di danno	Unità	Alternativa A	Alternativa B
Human Health	Daly	0,00116	0,00103
Ecosystem quality	PDF*m ² yr	66,2	54,8
Resources	MJ surplus	2,81E-3	79,8
Totale	Pt	123	105

La categoria di impatto che ha determinato la maggiore differenza tra le due soluzioni progettuali e al contempo la maggiore criticità ambientale dell'alternativa A, in merito allo sfruttamento delle risorse, è stata quella riguardante l'uso dei minerali.

Categoria d'impatto	Unità	Alternativa A	Alternativa B
Carcinogens	Daly	5,85E-5	4,62E-5
Respiratory inorganics	Daly	0,000646	0,000558
Climate change	Daly	0,000423	0,00039
Radiation	Daly	5,66E-6	4,44E-6
Ozone layer	Daly	2,46E-5	2,45E-5
Ecotoxicity	PDF*m ² yr	25,2	21,4
Acidification/Eutrophication	PDF*m ² yr	18,3	16
Land use	PDF*m ² yr	22,7	17,4
Minerals	MJ surplus	40,6	32,3
Fossil fuels	MJ surplus	2,77E3	2,34E3

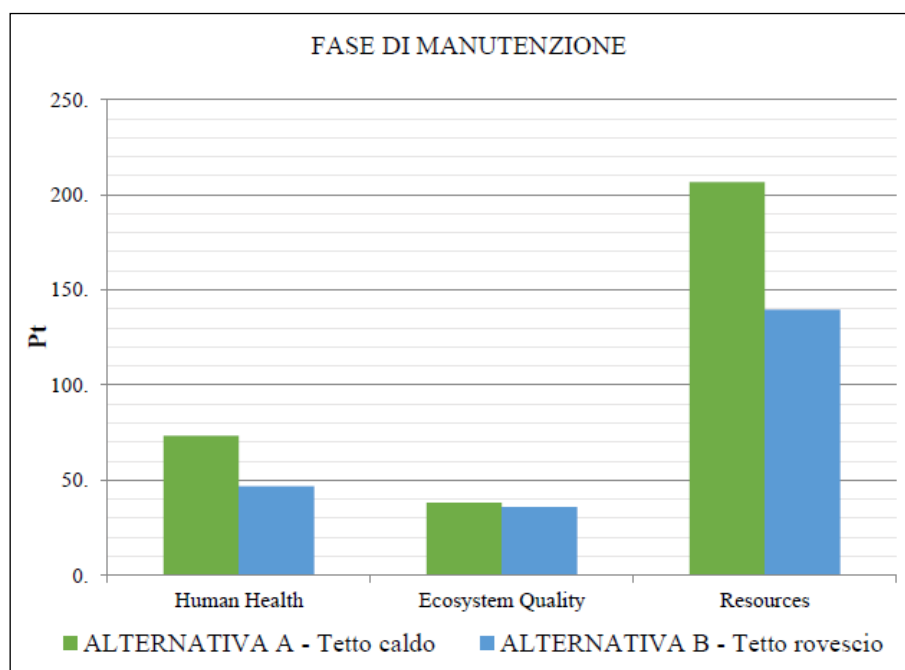


Categoria di danno	Unità	Alternativa A	Alternativa B
--------------------	-------	---------------	---------------

Human Health	Pt	25,7	23,2
Ecosystem Quality	Pt	7,67	6,61
Resources	Pt	103	88,5
Totale	Pt	136	118

Anche nella fase di esecuzione, l'alternativa A è risultata la soluzione progettuale responsabile dei maggiori danni, con un impatto ambientale totale pari a 136 Pt contro i 118 Pt dell'alternativa B.

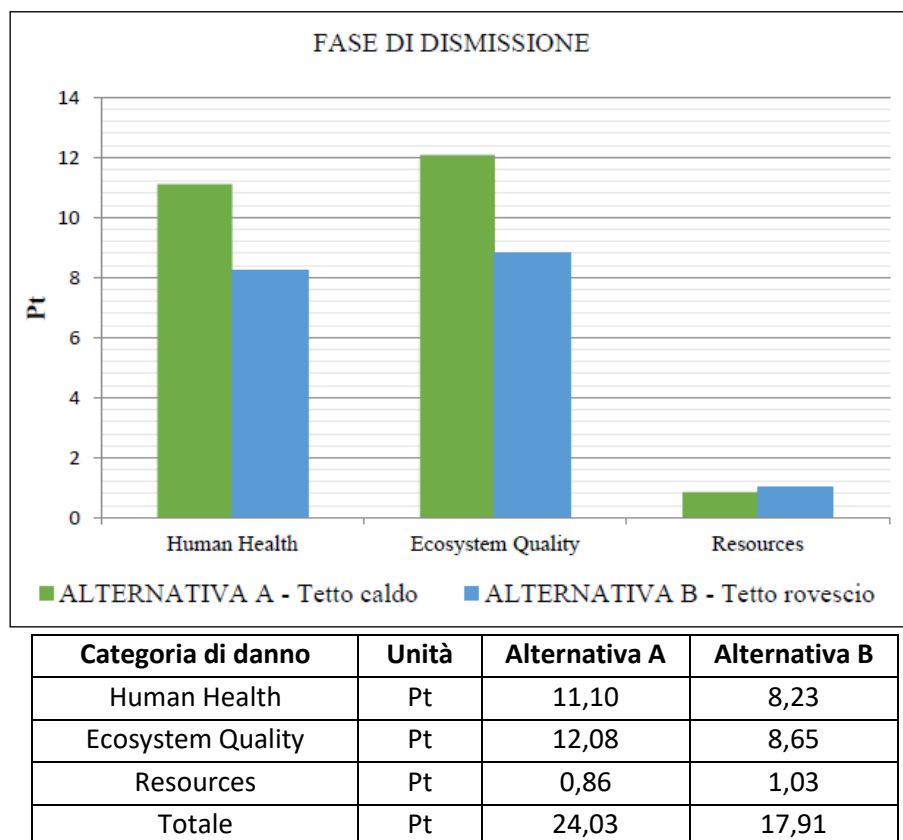
Categoria di impatto	Unità	Alternativa A	Alternativa B
Carcinogens	Daly	6,44E-5	5,2E-5
Respiratory organics	Daly	2,92E-6	2,59E-6
Respiratory inorganics	Daly	0,00077	0,000684
Climate change	Daly	0,000455	0,000424
Radiation	Daly	6,35E-6	5,12E-6
Ozone layer	Daly	2,46E-5	2,45E-5
Ecotoxicity	PDF*m ² yr	29	25,5
Acidification/Eutrophication	PDF*m ² yr	22,2	20,0
Land use	PDF*m ² yr	27,6	22,4
Minerals	MJ surplus	48,8	40,0
Fossil fuels	MJ surplus	3,01E3	2,59E3



Categoria di danno	Unità	Alternativa A	Alternativa B
Human Health	Pt	73,373	46,802
Ecosystem Quality	Pt	37,948	35,751
Resources	Pt	206,729	139,577
Totale	Pt	318,05	222,13

Discorso analogo per la fase di manutenzione, dove il divario tra le due alternative è risultato più accentuato non solo nella categoria di danno connessa alle risorse ma anche in quella relativa alla salute umana.

In questo caso l'impatto ambientale totale relativo alla soluzione tetto caldo è risultato maggiore del 43% rispetto alla soluzione tetto rovescio, questo perché l'alternativa A necessita di un'attività manutentiva più intensa durante il suo ciclo di vita. Infatti, poiché il sistema tetto caldo garantisce una durata dimezzata rispetto al tetto rovescio, occorre effettuare, nell'arco della vita utile di 60 anni, due interventi di rifacimento del manto bituminoso a cui sommare inoltre gli interventi di verniciatura protettiva acrilica previsti ogni due anni.



Anche nella fase di dismissione l'alternativa B è risultata la soluzione più sostenibile, con un valore di impatto ambientale totale pari a 17,91 Pt rispetto ai 24,03 Pt dell'alternativa A. Questa volta però le categorie di danno che hanno presentato le maggiori criticità sono state quelle connesse alla salute dell'uomo e alla qualità dell'ecosistema. Danni causati dall'impossibilità di poter riciclare i materiale a base di bitume, che nel caso della stratigrafia del sistema tetto caldo costituiscono l'86 % mentre nel sistema tetto rovescio circa il 12 %.

Life Cycle Costing

Come per la metodologia *Life Cycle Assessment*, anche per la *Life Cycle Cost Analysis* sono state suddivise le fasi del ciclo di vita in:

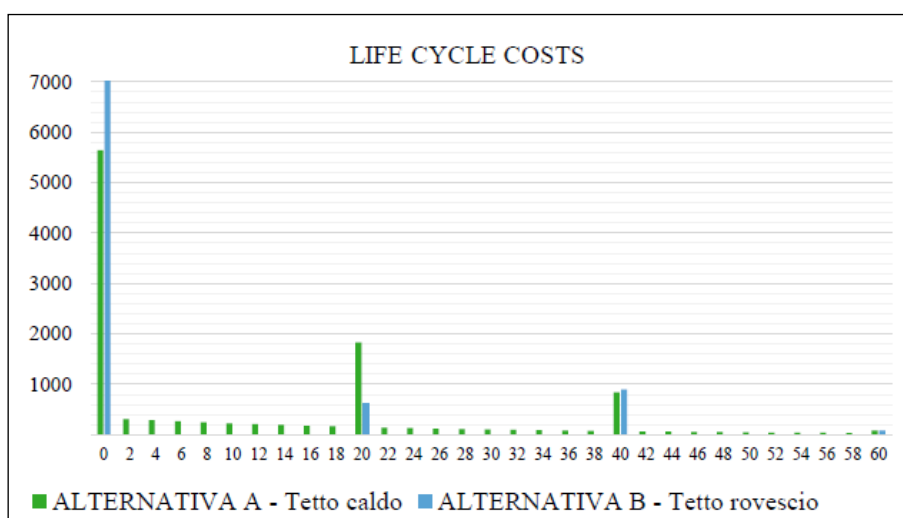
- *Costruzione*, che comprende i costi dovuti alle fasi di esecuzione in opera;
- *Manutenzione*, che comprende i costi imputabili alle attività manutentive;
- *Dismissione*, che comprende i costi dovuti alle fasi di fine vita.

Mediante l'ausilio del Prezzario Regionale e di fonti esterne dirette, qualora necessario, è stato redatto un computo metrico estimativo per le diverse fasi di ciascun intervento, ottenendo così, i relativi costi di seguito esposti:

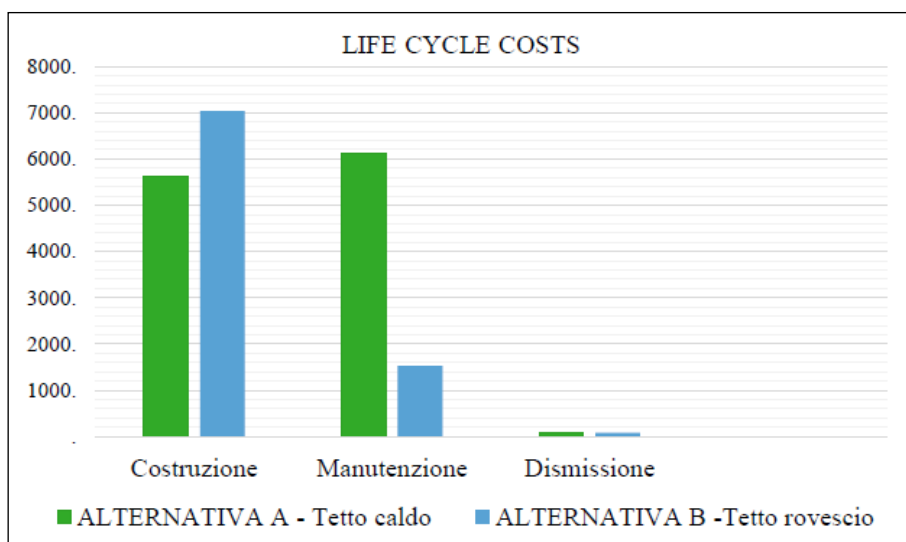
ALTERNATIVA A – Tetto caldo		
Costruzione	Anno 0	5.576,26 €
Manutenzione		
Vernice acrilica	Ogni 2 anni	334,00 €
Rifacimento manto impermeabile	Ogni 20 anni	2.267,90 €
Rifacimento intonaco	Ogni 20 anni	1.378,42 €
Dismissione	Anno 60	851,73 €

ALTERNATIVA B – Tetto rovescio		
Costruzione	Anno 0	6.977,25 €
Manutenzione		
Rifacimento manto impermeabile	Ogni 40 anni	2.874,11 €
Rifacimento intonaco	Ogni 20 anni	1.378,42 €
Dismissione	Anno 60	849,69 €

Per stimare il *Life Cycle Cost* di ciascuno dei due sistemi di isolamento, occorre procedere con l'attualizzazione dei costi tabellati, in modo tale da stabilire il valore attuale di un capitale che ha come naturale scadenza una data futura, mediante l'applicazione di un tasso di sconto: i risultati sono esposti nell'istogramma sotto riportato.



Prendendo inoltre in considerazione il costo di costruzione, la sommatoria dei costi attualizzati riferiti alla fase di manutenzione ed il costo attualizzato della fase di dismissione, si è ottenuto:



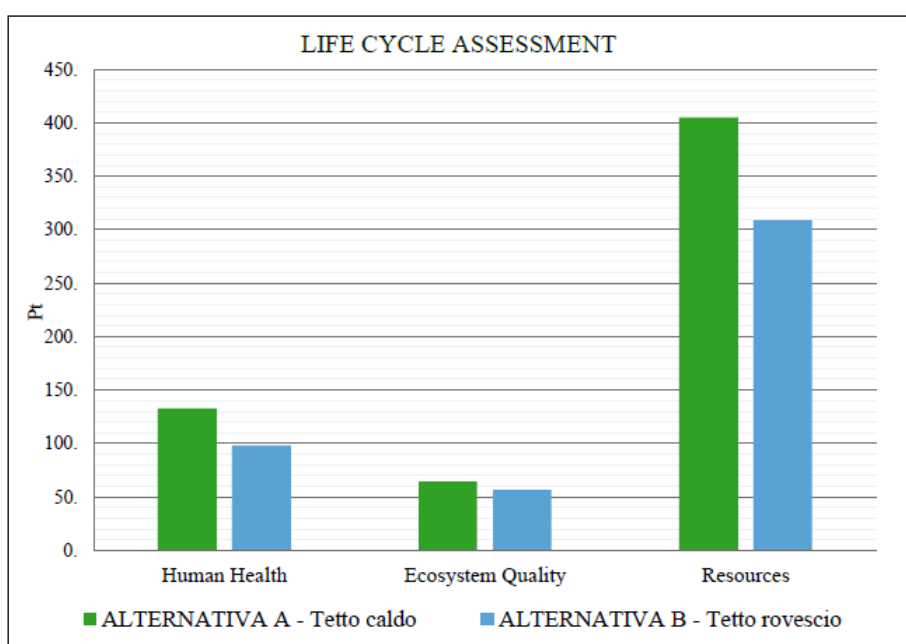
La seguente tabella mostra i costi attualizzati riferiti a ciascuna fase dei due interventi:

FASI	ALTERNATIVA A	ALTERNATIVA B
Costruzione	5.636,75 €	7.037,16 €
Manutenzione	6.116,02 €	1.528,55 €
Dismissione	81,19 €	80,99 €

RISULTATI

L'applicazione delle metodologie *Life Cycle Assessment* e *Life Cycle Cost* al presente studio ha permesso di valutare e confrontare l'impatto ambientale ed economico delle due alternative progettuali proposte, e di individuare quindi la soluzione più sostenibile.

Dai risultati dell'analisi *Life Cycle Assessment* è emerso che l'Alternativa B rappresenta la scelta meno impattante in ogni fase del ciclo di vita analizzata, ottenendo in particolare una riduzione dei danni ambientali riferiti all'uso delle risorse e alla salute umana di circa il 25 % rispetto all'Alternativa A.



Categoria di danno	Unità	Alternativa A	Alternativa B
Human Health	Pt	132,70	98,08
Ecosystem Quality	Pt	64,15	56,53
Resources	Pt	409,90	308,96

La maggiore criticità ambientale dell'Alternativa A, nelle diverse categorie di danno, è determinata sia dalla necessità di dover prevedere un'attività manutentiva più intensa sia dalla maggiore percentuale di materiali non riciclabili.

A tal proposito, considerando unicamente i rifiuti prodotti dalla stratigrafia dei due tetti, risulta chiaro che il sistema tetto rovescio rappresenta la soluzione più vicina agli indirizzi europei in merito al riciclo dei rifiuti da costruzione e demolizione.

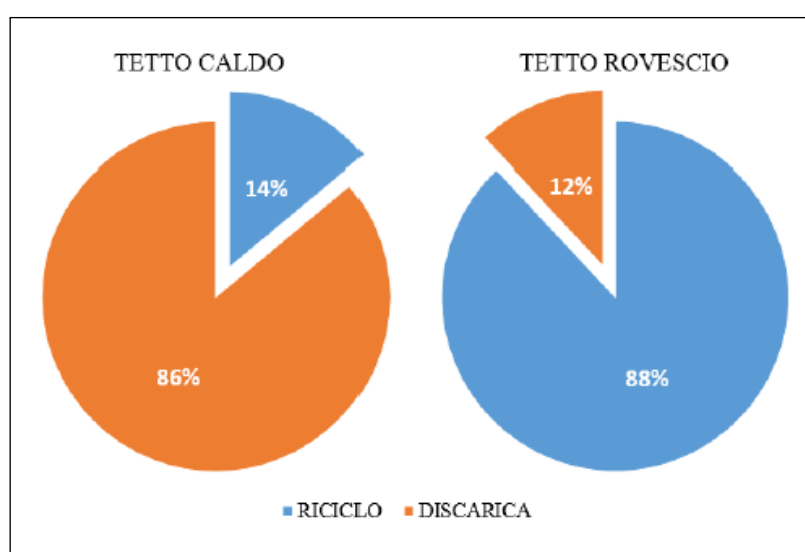


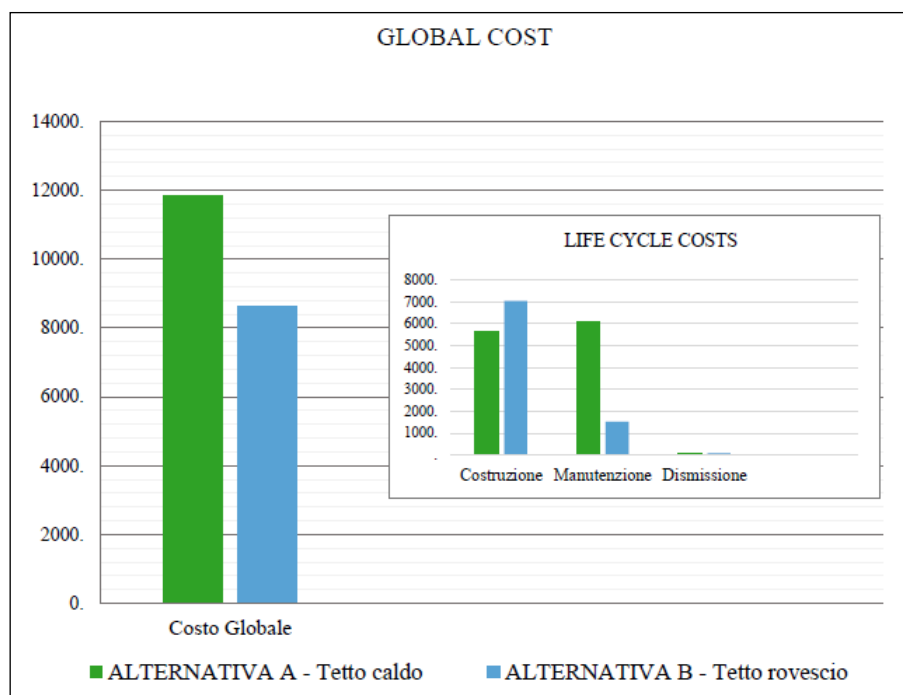
Figura 9 - dal confronto fra le due soluzioni progettuali, che tiene in considerazione la possibilità di riciclo dei materiali, di può notare come la percentuale di materiale che è possibile re immettere nel ciclo produttivo è molto maggiore per l'Alternativa B – tetto rovescio

La maggiore sostenibilità dell'Alternativa B è stata confermata anche dal punto vista economico grazie all'analisi *Life Cycle Cost*.

Infatti, nonostante il maggior costo iniziale, tale alternativa costituisce la soluzione economicamente più vantaggiosa con un costo globale attualizzato pari a 8646,70 euro rispetto agli 11833,96 euro dell'alternativa A.

L'incremento delle spese previste per il tetto caldo è risultato imputabile alla fase manutentiva, ottenendo una differenza dei costi di manutenzione, tra le due soluzioni progettuali, del 75%.

Il confronto in termini di costo globale è riassunto nell'istogramma di seguito riportato.



CONCLUSIONI

Molto spesso il confronto in termini di convenienza economica tra diverse soluzioni progettuali viene effettuato erroneamente sulla base del solo costo di realizzazione, trascurando la fondamentale considerazione dei costi di manutenzione, di gran lunga più elevati nel ciclo di vita.

Per cui l'individuazione della soluzione economicamente più vantaggiosa non può prescindere dall'utilizzo di un approccio *Life Cycle* che consenti di avere una visione economica d'insieme, "dalla culla alla tomba", e che soprattutto tenga in debito conto la valutazione degli impatti che le scelte di progetto determinano sull'ambiente.

L'analisi condotta con entrambi gli approcci, LCA e LCC su una semplice copertura piana, per la quale si sono prese in considerazione due alternative progettuali classiche (tetto caldo e tetto rovescio) ha dimostrato che per quelle che sembrano soluzioni molto simili, tuttavia il solo fatto di prendere in considerazione l'intero ciclo di vita porta a differenze da ritenere significative.

L'analisi ha anche dimostrato lo stretto connubio che esiste tra LCA e LCC, in quanto inevitabilmente il tipo e la frequenza dell'attività manutentiva finiscono col ripercuotersi sull'ambiente, e ciò sottolinea il concetto che non si ripeterà mai abbastanza, ovvero che in ambito di sostenibilità non si devono trascurare due requisiti indispensabili: la resilienza e la durabilità.

Si può a buona ragione affermare che "programmare la manutenzione" con l'ausilio di strumenti di supporto decisionale, come le metodologie LCC e LCA, equivale a **"programmare la sostenibilità"**. La manutenzione va ben oltre la definizione di "mantenimento dell'efficienza delle prestazioni offerte" per estendersi ad una visione strategica ben più ampia, fondata sulla riduzione del consumo di risorse e sulla responsabilizzazione dei comportamenti.

BIBLIOGRAFIA

ALLIONE C., LANZAVECCHIA C., *Dall'ecodesign all'architettura*, quaderni di design, Torino, 2008

ANCE, *Osservatorio congiunturale sull'industria delle costruzioni*, 2017

ARDENTE F. et al., *L'analisi del ciclo di vita applicata agli edifici residenziali*, "La Termotecnica", settembre 2009

- ASPRONE D., PROTA A., MANFREDI G. et al. , *La valutazione della sostenibilità in edilizia* ,Ingenioweb, 2012
- BONOLI A. , *I materiali riciclati “driver” dell’edilizia sostenibile*, Ingenioweb, 2015
- CATTANEO M., *Manutenzione, una speranza per il futuro del mondo*, Ed. Franco Angeli, 2012
- CINIERI V., ZAMPERINI E., *Riqualificazione sostenibile degli edifici esistenti residenziali*, Ingenioweb, 2015
- CRESME: è il “recupero” il motore dell’edilizia, Tile Italia, n°1, 2017, pp. 38-39
- DE FALCO F., *Sostenibilità programmata del patrimonio edilizio: analisi LCA e LCC per la scelta degli interventi*, Tesi di laurea magistrale, Napoli, 2017
- D.Lgs. 18 aprile 2016, n.50 *Codice dei contratti pubblici*
- D.M 11 gennaio 2017, *Adozione dei criteri ambientali minimi per gli arredi per interni, per l’edilizia e per i prodotti tessili*
- ISTAT, *Annuario statistico italiano 2015*, dicembre 2015, cap.18
- LUCCHINI A., RIZZI F., *Ciclo di vita*, in AA.VV., *Costruire Sostenibile*, Alinea editrice s.r.l, Firenze, 2000
- LEGAMBIENTE, *Recycle – La sfida nel settore delle costruzioni*, 2° Rapporto dell’Osservatorio Recycle, 2016
- OBERTI I., *Prodotti edilizi per edifici compatibili*, Maggioli Editore, 2014
- PEGHINI A., *Linee guida Arca per la “Life Cycle Assessment”*, Arca, 2014,
- PINTO M.R., *Procedure e strumenti innovativi per la gestione e la manutenzione degli edifici*, in R. Landolfo (a cura di), M. Losasso (a cura di), M. R. Pinto (a cura di), *Innovazione e sostenibilità negli interventi di riqualificazione edilizia*, Ed. Alinea , 2013
- SFERRA A.S., *Obiettivo “quasi zero”. Un percorso verso la sostenibilità ambientale*, Franco Angeli, 2013
- TACCONI G., *Sostenibilità in edilizia – Prontuario delle norme e delle linee guida europee, nazionali e regionali*, Wolters Kluwer, 2016