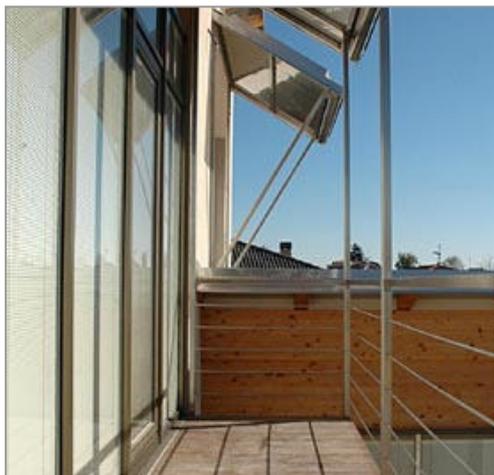


Torino, Ottobre 2007

RAPPORTO DI RICERCA

VALUTAZIONE DELLA SOSTENIBILITA' AMBIENTALE DI UNA CASA A BASSO CONSUMO ENERGETICO CON METODOLOGIA LCA (*LIFE CYCLE ASSESSMENT*)



Politecnico di Torino

DITAG – Dipartimento di Ingegneria del Territorio, dell'Ambiente e delle Geotecnologie

Ing. Gian Andrea Blengini

Ing. Tiziana Di Carlo

Dott. Agnese Fiorenza

Ing. Katia Zavaglia

In collaborazione con Studio Roatta Architetti Associati - Mondovì

Arch. Martino Roatta

Arch. Maurizio Roatta



Abstract	3
1.0 Approccio LCA e settore delle costruzioni	4
1.1 Metodologia LCA nel settore delle costruzioni	5
1.2 L'oggetto della ricerca: la casa a corte in Morozzo	9
2.0 ANALISI LCA DELLA CASA DI MOROZZO	14
2.1 Definizione obiettivi e campo di applicazione	14
2.1.1 La casa a corte in Morozzo	14
2.1.2 La casa standard (edificio di riferimento)	14
2.1.3 Caratteristiche dell'edificio	14
2.2 Confini di sistema e Unità funzionale	15
2.3 Descrizione della casa di Morozzo	16
2.4 Le fonti per il reperimento dei dati	18
2.4.1 Fase di pre-uso	18
2.4.2 Fase d'uso	19
2.4.3 Fase di fine vita	20
2.5 Inventario della di Morozzo	21
2.5.1 L'involucro edilizio.....	21
2.5.2 L'impiantistica dell'edificio	25
2.5.3 Fase cantieristica	27
2.5.4 Fase d'uso	28
2.5.5 Fine vita.....	31
2.6 Inventario della casa standard	37
2.6.1 Involucro e impiantistica	37
2.6.2 Fase d'uso	39
2.6.3 Fine vita.....	40
3.0 RISULTATI DELLO STUDIO LCA	41
3.1 Life cycle mass (materiali di ciclo vita)	41
3.2 Valutazione e interpretazione degli impatti di ciclo di vita	44
3.2.1 LCIA: life cycle impact assessment.....	45
3.2.2 Analisi di contributo.....	46
3.2.3 Analisi di un diverso scenario di fine vita (100% Discarica).....	57
3.2.4 Confronto tra modello LCA della casa di Morozzo e casa standard.....	58
DISCUSSIONE DEI RISULTATI E CONCLUSIONI	61
Bibliografia	63
Allegato (Tavola grafica – Diagramma di flusso del Ciclo di Vita formato A1).....	65



Abstract

La trasformazione dell'edilizia residenziale verso migliori standard di sostenibilità ambientale nasce non solo come risposta alla domanda di soluzioni abitative salubri e confortevoli, ma soprattutto da obiettivi di mitigazione dei pesanti impatti ambientali e consumi energetici del settore civile.

Poiché è risaputo che consumi energetici e relative conseguenze ambientali sono dovuti in buona parte alla fase d'uso degli edifici stessi, coerentemente le recenti normative nazionali e di alcune regioni italiane in materia di risparmio e certificazione energetica stanno perseguendo obiettivi di minore e migliore utilizzo delle fonti energetiche soprattutto per quanto riguarda il riscaldamento invernale delle abitazioni.

Tuttavia i carichi energetici ed ambientali riconducibili al settore civile non sono solo quelli legati ai consumi in fase d'uso, poiché la produzione e il trasporto dei materiali da costruzione e la relativa messa in opera, nonché la demolizione dell'edificio stesso alla fine della sua vita utile ed il conseguente smaltimento aggiungono ulteriori impatti che devono essere sommati ai primi.

Di conseguenza, il giudizio sulla sostenibilità ambientale di un edificio deve essere esteso a tutte le fasi del ciclo di vita e deve essere supportato da una metodologia scientificamente valida ed oggettiva, ad esempio la LCA (Life Cycle Assessment) basata sugli standard ISO 14040.

La presente ricerca parte da un'analisi della letteratura scientifica internazionale sull'applicazione della LCA al settore delle costruzioni, da cui si evince che la fase d'uso degli edifici è responsabile per il 90-95% dei consumi energetici e conseguenti impatti ambientali di ciclo vita. Tuttavia, se in un edificio convenzionale le fasi di produzione dei materiali, trasporto e messa in opera incidono in minima parte sugli impatti di ciclo vita, nel caso di un edificio a basso consumo energetico i rapporti di forza sono capovolti.

L'applicazione rigorosa e dettagliata dell'analisi LCA ad una casa a basso consumo energetico, recentemente costruita nel Comune di Morozzo in Provincia di Cuneo con il parziale contributo finanziario della Regione Piemonte, ha confermato la necessità di ri-considerare il ruolo ed il peso di tutte le fasi del ciclo di vita del futuro patrimonio edilizio.

Per quanto riguarda l'edificio caso studio, la notevole riduzione dei consumi energetici in fase d'uso ha messo in evidenza il drastico incremento dei contributi relativi dei materiali da costruzione e della loro messa in opera. In edificio a basso consumo energetico, infatti, la scelta dei materiali e delle tecniche costruttive non sono più elementi trascurabili, così come l'adozione di particolari tecniche de-costruttive e di opportuni processi di riciclaggio dei materiali da costruzione al termine della vita utile degli edifici diventano strategici in termini di contenimento dei consumi energetici, delle emissioni inquinanti e della produzione di rifiuti.

La ricerca mette a disposizione di progettisti ed amministrazioni pubbliche un nuovo caso studio che può integrare il non vasto panorama delle applicazioni LCA nel settore delle costruzioni in Italia, aggiungendo informazioni di dettaglio, basate su dati misurati in cantiere, sulle fasi iniziali e finali del ciclo di vita che in molti casi vengono trascurate o considerate con approccio speditivo.

I risultati conseguiti dimostrano che la quantificazione della sostenibilità ambientale di un edificio a basso consumo energetico non può prescindere da una rigorosa analisi del ciclo di vita.

Parole chiave: LCA, risparmio energetico, edilizia sostenibile, fine vita, eco-profilo



1.0 Approccio LCA e settore delle costruzioni

Il settore delle costruzioni, pur costituendo un elemento cardine dell'economia italiana, con un contributo significativo al processo di sviluppo economico (5% del PIL, 8% dell'occupazione nel 2005 - dati ISTAT 2005) presenta tuttavia notevoli impatti ambientali diretti ed indiretti.

Questi, in particolare, consistono sostanzialmente nell'elevato consumo di energia, legato alla realizzazione dei manufatti ed alla fase d'uso degli stessi, nel consumo di risorse naturali e nel degrado del territorio.

Sulla base delle statistiche ufficiali, nell'anno 2004 il settore civile ha consumato il 31% dell'energia primaria in Italia (al 93% generata da fonti non rinnovabili) per cui è ritenuto responsabile del 30,5% delle emissioni di gas serra (ENEA, 2005).

Tuttavia queste statistiche si riferiscono alla sola fase d'uso degli edifici, corrispondente ai carichi energetico-ambientali connessi alla gestione ordinaria del patrimonio edilizio (residenziale e strumentale). Se alla fase d'uso aggiungiamo la produzione dei materiali da costruzione e la loro messa in opera, si stima che il contributo complessivo salga al 37% dell'energia ed al 41% delle emissioni di gas serra (ENEA, 2005).

Al consumo di energia, in larga parte non rinnovabile, e il conseguente effetto serra, vanno poi aggiunti altri impatti ambientali tra cui il massiccio consumo di materie prime non rinnovabili e l'uso del territorio, a cui è legato l'ulteriore problema della destinazione finale delle macerie derivanti dalle demolizioni di edifici dismessi. Quest'ultimo gruppo di problemi ambientali, a scala regionale/locale, sta notevolmente impegnando i legislatori e gli amministratori degli enti territoriali i quali si trovano a dover fornire gli strumenti di pianificazione territoriale mirati alla corretta gestione delle risorse del territorio.

In sintesi, il "problema ambientale" riconducibile al settore delle costruzioni comprende sia la scala globale (uso di risorse non rinnovabili, effetto serra), sia quella regionale/locale (uso del territorio e delle sue risorse, smaltimento dei rifiuti).

Per troppo tempo le problematiche energetico-ambientali riconducibili agli edifici sono state affrontate per comparti separati, limitando molte volte l'analisi alla sola fase di esercizio. In questo modo, alcuni importanti impatti ambientali riferibili al ciclo di vita degli edifici sono stati trascurati e, in altre occasioni, i miglioramenti apportati puntualmente si sono rivelati inefficaci.

Ad esempio, materiali da costruzione definiti, forse troppo frettolosamente, eco-compatibili poiché di origine naturale, si sono rivelati poco performanti dal punto di vista dell'isolamento termico in fase d'esercizio, oppure inadatti al recupero di materie prime secondarie in fase di trattamento delle macerie a fine vita.

Per questo motivo negli ultimi anni sono aumentati considerevolmente anche nel settore delle costruzioni il numero e la tipologia di applicazioni dell' LCA, metodologia caratterizzata dall'approccio globale, cioè unitario e complessivo, alla valutazione dei problemi ambientali di un determinato sistema produttivo, idonea quindi ad affrontare efficacemente le suddette problematiche e a promuovere un effettivo miglioramento.

1.1 Metodologia LCA nel settore delle costruzioni

La metodologia di Analisi di Ciclo di Vita (Life Cycle Assessment - LCA), codificata dalle norme UNI EN ISO serie 14040, può essere definita:

“Tecnica oggettiva di valutazione ambientale per la quantificazione degli impatti ambientali di un prodotto o di un processo durante tutte le fasi del ciclo di vita, attraverso la misura sistematica di tutti gli scambi fisici da e per il sistema ambiente”.

Tale metodologia (Figura 1.1.1) è basata su criteri oggettivi che consentono di individuare e valutare i potenziali impatti ambientali ed i carichi energetici di un prodotto/processo produttivo, attraverso l'identificazione dei flussi in entrata (materiali, risorse ed energia) e in uscita (rifiuti ed immissioni nell'ambiente) lungo tutto il ciclo di vita.

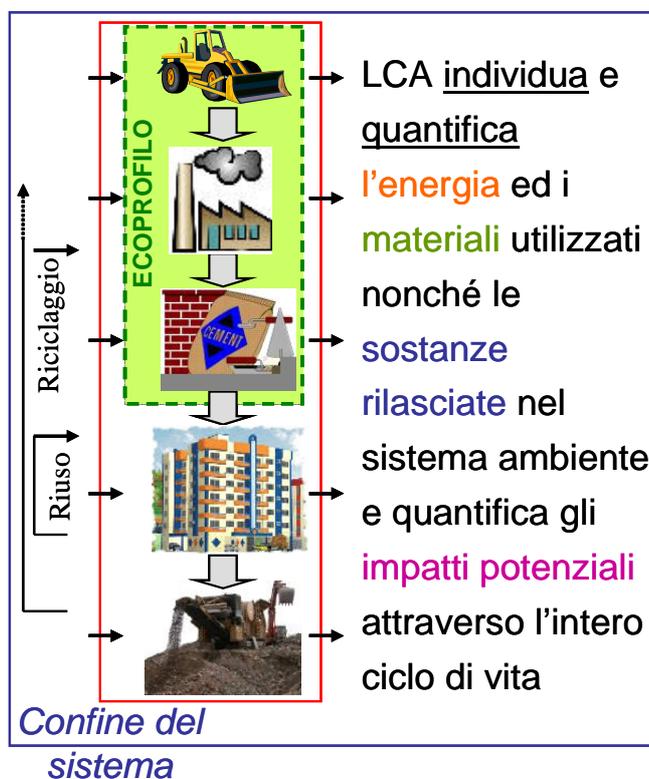


Figura 1.1.1 - Schema operativo della LCA applicata al settore delle costruzioni

L'approccio LCA, quantitativo, e quindi prettamente ingegneristico, nato nei primi anni '70, ma diffusosi in modo esponenziale negli anni '90, costituisce un modo innovativo di affrontare le problematiche ambientali legate ad un prodotto o ad un processo.

Infatti, mediante un'analisi cosiddetta “dalla-culla-alla-tomba”, il sistema produttivo è considerato in ottica globale e, di conseguenza, ipotesi e/o tentativi di miglioramento puntuale vengono valutati con riferimento all'intero ciclo di vita.

La valutazione comprende dunque: l'estrazione ed il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale.

Le analisi LCA, inizialmente più diffuse nell'industria in senso stretto, vengono oggi comunemente applicate, come si è detto, anche alla quantificazione degli impatti ambientali associati al ciclo di vita di un edificio.



Nel caso specifico delle costruzioni, l'analisi LCA può essere a pieno titolo considerata uno strumento di progettazione di tipo ingegneristico, utile a fornire risposte quantitative alle seguenti problematiche:

- Selezione dei materiali, nel rispetto della loro funzione in opera;
- Scelta delle tecniche costruttive;
- Individuazione delle soluzioni impiantistiche;
- Gestione del fine vita dell'edificio.

L'applicazione della LCA già nella fase di progettazione preliminare di un edificio può fornire informazioni oggettive di natura energetico-ambientale al fine di supportare le successive fasi di progettazione esecutiva, consentendo, in particolare, di imputare ad elementi e componenti strutturali ed impiantistici i corrispondenti impatti ambientali di ciclo di vita, fornendo dunque un valido contributo al processo decisionale.

L'obiettivo è quello di indirizzare le scelte progettuali mediante un approccio alla valutazione di "sistema" dei carichi energetico-ambientali dei materiali, delle tecniche costruttive e delle tipologie degli impianti di servizio che, a livello complessivo e non di singolo componente, corrispondano al minor consumo di risorse ed impatti ambientali. Grazie all'approccio LCA, è possibile il confronto, già in fase preliminare, tra diverse soluzioni progettuali, mettendo in evidenza le prestazioni energetico-ambientali di ognuna di queste. Una volta effettuate le scelte progettuali, è poi possibile misurarne l'efficacia, attraverso la ri-applicazione iterativa della tecnica LCA, in modo da valutare l'efficacia delle eventuali proposte di cambiamento e/o miglioramento (fase di Life Cycle Improvement).

Allo scopo di garantire una conoscenza sufficientemente approfondita delle varie fasi del ciclo di vita dell'edificio, l'analisi LCA deve essere condotta da un team di ricerca necessariamente multidisciplinare, da affiancare al progettista.

Il modello LCA dell'edificio deve comprendere tutte le fasi principali descritte nella Figura 1.1.2.

Lo sviluppo dell'analisi LCA prevede di suddividere ulteriormente le fasi principali del ciclo di vita in unità di processo per le quali verranno individuati e quantificati input e output fisici, in termini di prelievi di energia e materiali dall'ambiente e emissioni di reflui nell'ambiente (*Fase di Inventario – ISO 14040*).

Nel caso di un edificio i dati necessari sono dunque (a grandi gruppi) i seguenti:

- Materiali costituenti l'involucro e le opere accessorie;
- Materiali costituenti gli impianti;
- Consumi energetici di cantiere;
- Consumi di materiali ausiliari in cantiere;
- Sfridi di cantiere;
- Consumi di energia e materiali in fase d'uso (energia elettrica, combustibili, acqua, ecc.);
- Materiali per manutenzione ordinaria;
- Previsione della vita utile dell'edificio;
- Consumi di energia e materiali in fase di smantellamento dell'edificio.

Oltre a questi dati "diretti" che devono essere definiti con il progettista devono essere disponibili i dati "indiretti" ovvero quelli riferibili alla produzione dei materiali da costruzione e relativi alle fonti energetiche (da banche dati o da studi LCA pregressi). Allo stesso modo servono i dati di input e output relativi alle operazioni di trattamento / riciclaggio delle macerie.

Per ciascuna fase dello studio LCA, di seguito descritte, devono essere resi disponibili le informazioni e i dati da inserire nel modello LCA, da sviluppare con l'ausilio di software dedicati (per esempio SimaPro e Boustead Model).

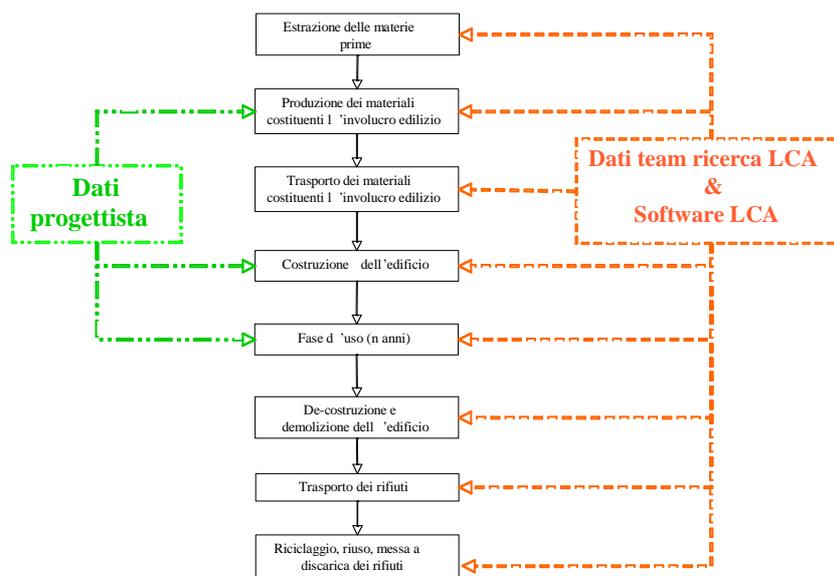


Figura 1.1.2 - Fasi dello studio LCA: ruolo del progettista e del team LCA

Fase 1: estrazione delle materie prime di base

I dati relativi a questa fase possono essere reperiti in studi LCA, oppure nelle banche dati contenute nelle applicazioni software utilizzate, oppure dalla letteratura specialistica.

Fase 2: produzione dei materiali da costruzione selezionati per l'edificio

Le tipologie di materiali da costruzione sono definite in base alle indicazioni fornite dal progettista. Gli eco-profilo, ovvero le prestazioni energetico-ambientali, di tali materiali possono essere reperiti in studi LCA oppure nelle banche dati.

Fase 3: trasporto dei materiali in cantiere

I dati relativi a questa fase possono essere stimati dal team di ricerca LCA, anche sulla base dell'esperienza acquisita in precedenza.

Fase 4: costruzione dell'edificio

Per quanto riguarda il cantiere per la costruzione dell'edificio, nel modello LCA devono essere inseriti i dati relativi all'utilizzo di materiali ausiliari, sfridi di cantiere ed energia. Le quantità dei materiali dell'involucro devono essere forniti dal progettista con riferimento alle quantità necessarie alla realizzazione dell'edificio. La fase di manutenzione ordinaria e straordinaria dell'edificio dipende dal numero di anni di servizio di ciascun componente dell'involucro e degli impianti.

Fase 5: fase d'uso dell'edificio

I dati relativi alla fase d'uso dell'edificio oggetto di studio devono essere desunti dal progetto e possono eventualmente essere integrati con i dati di ricerche pregresse e/o statistiche nazionali/regionali.

Fase 6: de-costruzione

E' questa certamente la fase più problematica ed aleatoria, in cui devono essere ipotizzate, con vari decenni d'anticipo, le operazioni per la de-costruzione dell'edificio, finalizzate al successivo riciclaggio/recupero dei materiali. Per le operazioni di de-costruzione si può utilizzare l'esperienza acquisita in altri cantieri di demolizione, oppure far riferimento all'esiguo numero di pubblicazioni scientifiche che affrontano l'argomento in termini di LCA.

Fase 7: riciclaggio-riuso- messa a discarica dei materiali derivanti dalla demolizione dell'edificio

In questa fase devono essere ipotizzate le operazioni per il riciclaggio/recupero dei materiali, includendo la collocazione a discarica dei materiali residui. Le ipotesi di lavoro su cui si basa questa fase devono essere verosimili e credibili, in modo che solo i materiali separabili, e non semplicemente tutti i materiali potenzialmente riciclabili, siano avviati al processo di recupero.

Le informazioni ottenute dall'Analisi di Inventario costituiscono la base di partenza per le valutazioni ambientali che caratterizzano la fase di Valutazione degli Impatti (terza fase di un'Analisi LCA secondo la normativa ISO 14040).

Questa ha lo scopo di evidenziare l'entità delle modificazioni ambientali che si generano a seguito del consumo di risorse provocato dalle attività produttive e dei rilasci di emissioni e reflui nell'ambiente.

Nel caso studio esaminato l'analisi degli impatti è stata, in un primo momento, focalizzata sulla procedura di Caratterizzazione (ISO14040), che porta alla determinazione dei valori degli Indicatori di categoria di Tabella 1.1.1. Questi sono, in sostanza, indicatori di impatto ambientale considerati scientificamente validi e condivisi dalla comunità scientifica internazionale.

Gli indicatori ambientali considerati sono quelli tipici di uno studio LCA volto alla stesura di una Dichiarazione Ambientale di Prodotto (EPD).

Tabella 1.1.1 - Tipici indicatori energetico-ambientali utilizzati per esprimere i risultati di una LCA

Categoria di impatto	Descrizione	Indicatore di impatto	Unità di misura
Consumo di risorse energetiche	Energia totale di ciclo vita (Diretta + Indiretta + Feedstock).	GER	[MJ]
Consumo di risorse energetiche non rinnovabili	Consumo di risorse energetiche non rinnovabili.	ENR	[MJ]
Effetto serra	Incremento della temperatura media atmosferica, causato dalle emissioni di gas serra.	GWP	[kg CO ₂ eq]
Buco dell'ozono	Riduzione della fascia di ozono stratosferico.	ODP	[kg CFC11 eq]
Eutrofizzazione	Abbassamento del tenore di ossigeno nei suoli e nelle acque superficiali.	EP	[kg PO ₄ ³⁻ eq]
Acidificazione	Abbassamento del pH di laghi, fiumi, foreste e dei suoli.	AP	[kg SO ₂ eq]
Formazione di smog fotochimico	Inquinamento dovuto alla presenza di idrocarburi incombusti e ossidi di azoto.	POCP	[kg C ₂ H ₄ eq]

Nella fase di Interpretazione degli impatti (ISO 14040) sono stati privilegiati gli indicatori di categoria GER (Gross Energy Requirement) e GWP100 (Global Warming Potential) poiché ritenuti più comprensibili dai non addetti ai lavori e comunque molto significativi per quanto riguarda il settore dell'edilizia.

Tuttavia, per non limitare l'analisi alle sole sfere dell'energia e dell'effetto serra, è stato anche utilizzato il metodo di pesatura Eco-Indicator 99 (Goedkoop and Spriensma 1999). Si tratta, in estrema sintesi, di un indicatore ambientale aggregato che racchiude in un solo parametro i più importanti effetti ambientali attraverso sofisticati modelli di valutazione dei danni presunti (end-point approach) e valutazioni soggettive, ad opera di un gruppo di esperti, sulla relativa importanza dei vari temi ambientali (salute umana, qualità dell'ecosistema e consumo risorse).

Tale metodo, anche se non condiviso, nell'impostazione, da molti membri autorevoli della comunità scientifica internazionale (Badino e Baldo 1998; Boustead et al. 2000; Scheuer et al. 2003; Georgakellos, 2006), è comunemente giudicato uno dei migliori strumenti attualmente disponibili.

L'Eco-Indicator 99 si basa su un'operazione di pesatura (ISO 14040) con cui i risultati ottenuti vengono convertiti tramite l'utilizzo di opportuni fattori numerici, in modo da determinare l'importanza di ogni singolo effetto e permettere il confronto e la determinazione del danno ambientale equivalente. L'Eco-indicator è espresso in punti [Pt].

Per la realizzazione del modello LCA è stata utilizzata l'applicazione software Sima Pro 7.

1.2 L'oggetto della ricerca: la casa a corte in Morozzo

La casa a corte in Morozzo

L'oggetto è una casa per una famiglia in un'area di lottizzazione del comune di Morozzo in provincia di Cuneo. Un piccolo lotto di forma quasi quadrata di 750 mq. La richiesta dei proprietari consiste in un programma di cucina-pranzo-soggiorno, uno studio, una lavanderia, una zona notte con due camere e una "dependance per ospiti" con camera da letto, bagno e angolo cottura, bagni, autorimessa coperta e vani interrati di cantina. Il tutto in una casa molto aperta e vetrata.

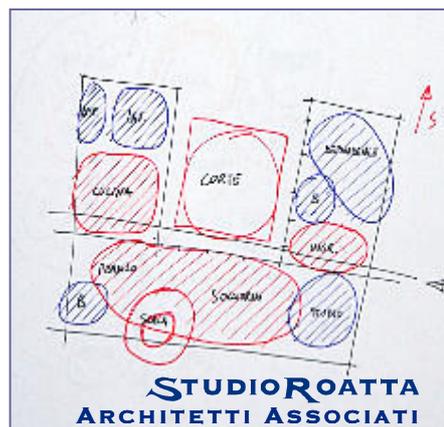
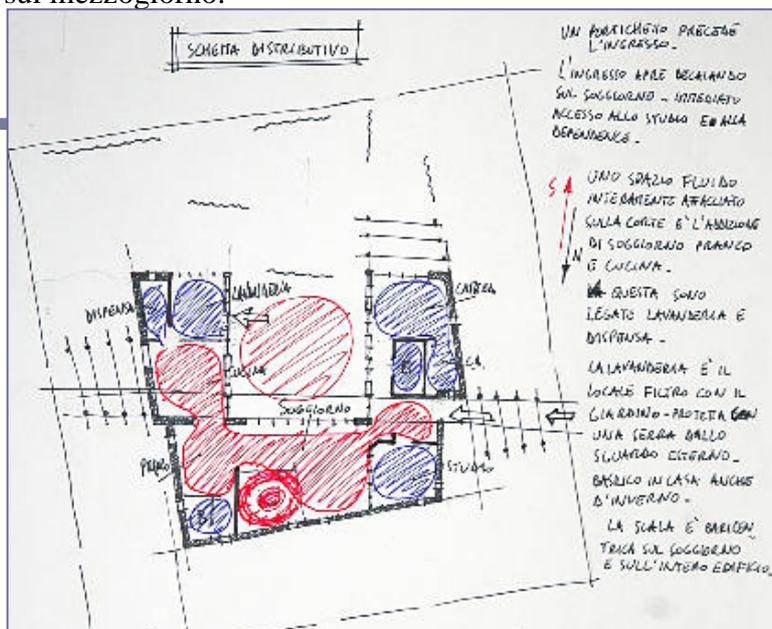
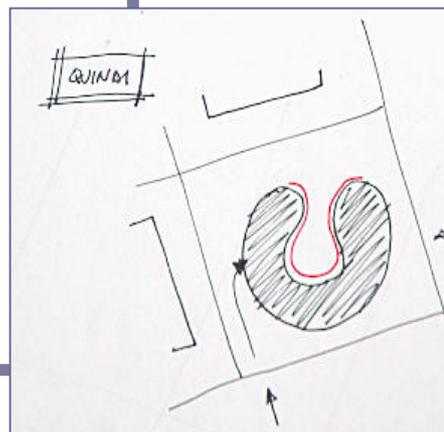
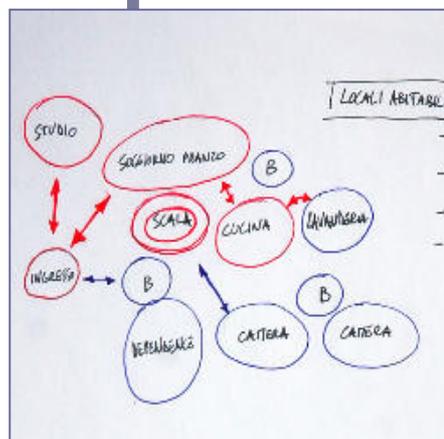
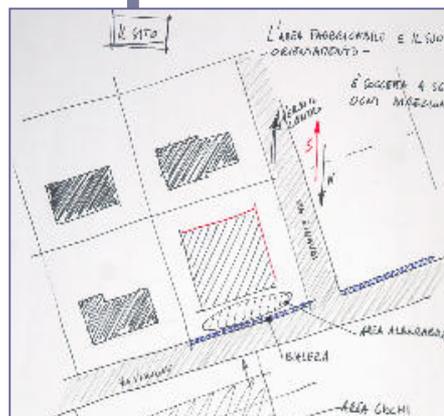
Il progetto deve organizzare questi locali in un insieme armonico per quello che riguarda la sequenza degli spazi e delle funzioni, la loro centralità o riservatezza, la brevità dei percorsi principali.

Il disegno dell'edificio

Si è tenuto in alta considerazione l'esposizione al sole e l'utilizzo dello spazio esterno, con l'ambizione di ottenere una certa riservatezza degli affacci realizzando vetrate senza trovarsi "in vetrina" e la possibilità di utilizzare lo spazio esterno protetti dagli sguardi dall'esterno.

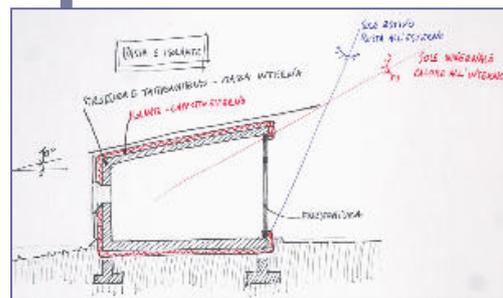
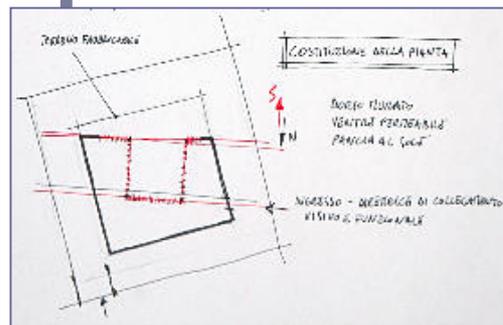
Quanto all'esposizione al sole se ne considera l'importanza in termini di qualità del comfort interno, di massimo utilizzo per l'illuminazione naturale e per l'efficienza energetica.

L'edificio pertanto si sviluppa intorno ad una corte centrale ed ha la natura di un massiccio guscio esterno che racchiude un "ventre" vetrato aperto sulla corte e sul mezzogiorno.



STUDIO ROATTA ARCHITETTI ASSOCIATI

La pianta è l'incontro di due geometrie: quella del guscio esterno che mantiene l'orientamento dei contorni del lotto, quella dell'interno che si disegna sulle linee degli assi cardinali per ottenere un affaccio principale esposto al pieno Sud. Questo affaccio permette infatti il miglior guadagno termico passivo invernale e il miglior controllo dell'irraggiamento estivo tramite le schermature: Le pensiline sopra le vetrate sono calcolate per ombreggiare completamente la vetrata nei mesi intorno al solstizio d'estate. La vetratura dei lati Est, Nord e Ovest è infatti contenuta al minimo, con l'apertura di piccole e rade finestre. Integrano il sistema una quantità di lucernari a tetto per l'illuminazione naturale interna.



Verifica dell'irraggiamento solare estivo e invernale sulla facciata esposta a Sud



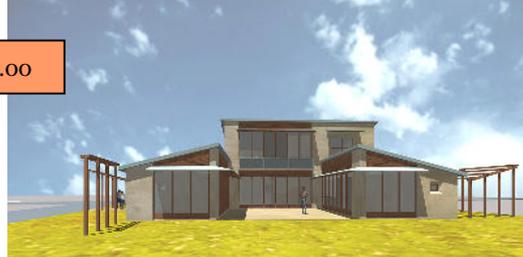
Ore 10.00



Ore 12.00



Ore 13.00



Ore 15.00



21 Dicembre Il guadagno termico è massimo. L'energia solare è accumulata all'interno.

21 Giugno La protezione dai raggi solari è completa senza la necessità di strutture mobili aggiuntive

Il sistema edificio-impianto

L'involucro ha alte prestazioni in termini di isolamento termico: Le pareti esterne sono rivestite con un isolamento "a cappotto" di 15 cm di sughero bruno, la copertura in legno contiene 22cm di fibra di legno ed è rivestita da una lamiera ventilata. I serramenti sono realizzati in legno-alluminio e ospitano un vetro a doppia camera con gas argon, stratificato interno e esterno, pellicola basso emissiva e veneziana interna alla seconda camera. (L'ombreggiamento prodotto dalle schermature esterne permette di utilizzare vetri ad alta trasparenza non essendo necessario filtrare l'irraggiamento estivo).

Molto importanti sono i sistemi di raccordo di tutti gli strati e gli spessori di isolante con le guaine impermeabili e le barriere al vapore, per controllare le condense e ottenere la massima riduzione dei *ponti termici* fra interno ed esterno.

La stessa struttura portante in c.a. del livello terreno è per questa ragione disgiunta da quella contenuta all'interno della parte abitata.

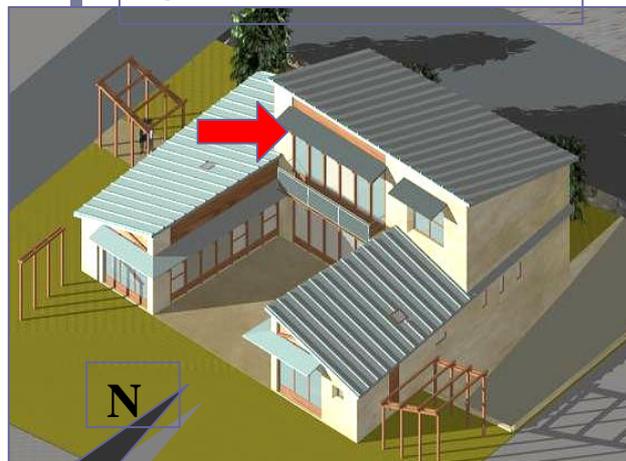
La definizione delle stratigrafie ed un calcolo del fabbisogno energetico che tiene conto dei fattori attivi e passivi portano al dimensionamento degli impianti termico e di climatizzazione. Il bassissimo fabbisogno ottenuto permette l'utilizzo di un sistema di distribuzione del calore *a bassa temperatura* tramite un impianto *a parete* costituito da tubi in Polibutilene disposti sotto intonaco. Si tratta di pannelli radianti non visibili che forniscono un'energia molto distribuita che non comporta sbalzi termici nello spazio interno.

La produzione del calore necessario al riscaldamento avviene tramite una pompa di calore aria-acqua capace di alti rendimenti alle basse temperature esterne.

L'efficienza del sistema viene inoltre dal distribuire il calore a bassa temperatura; ha costi energetici minori, poiché si riduce il differenziale di temperatura fra le temperature dell'aria esterna e quella di mandata.

L'edificio è poi dotato di un impianto di ventilazione meccanica controllata per il ricambio aria interna; l'aria in ingresso viene pretrattata con un passaggio in tubi interrati (scambiatore passivo) che la pre-riscaldano in periodo invernale e pre-raffrescano in periodo estivo. Un recuperatore di calore scambia energia fra l'aria in uscita e l'aria nuova in ingresso senza miscelarle.

I pannelli solari sono inseriti organicamente nell'architettura



Un piccolo impianto di pannelli solari termici è collegato ad un serbatoio per l'acqua calda sanitaria riducendo a pochi giorni all'anno il contributo della pompa di calore.



Progettazione integrata

Realizzare l'intera progettazione in modo integrato dalle prime fasi fino alla definizione degli esecutivi produce un progetto completo che tiene conto di tutte le esigenze strutturali, architettoniche e impiantistiche. Da un lato permette di orientare le funzioni, i volumi, le

aperture, il disegno degli spazi, in modo organico con il ciclo solare; dall'altro lato si realizza in tutti i particolari anche strutturali un involucro efficiente, con l'opportuna predisposizione per gli impianti necessari. Ciò rende possibile una programmazione dei lavori che riduce al minimo le variazioni in cantiere, i passi indietro e gli interventi sul già costruito e il conoscere in anticipo il comportamento energetico dell'edificio.

La risposta alle richieste della committenza è completa. L'edificio costruito ha alte prestazioni in termini di efficienza energetica in ragione delle stratigrafie utilizzate e della sua conformazione spaziale. Gli stessi risultati si hanno all'interno in termini di comfort climatico e di qualità quotidiana dell'abitare. Nel periodo estivo il comportamento energetico dell'edificio sarà pertanto indifferente alla presenza o meno del sole, mentre in inverno il fabbisogno diminuisce sensibilmente nei periodi soleggiati.

Il risultato

Ma la casa è facile da usare: realizzare il corretto orientamento e le adeguate schermature comporta avere ottimi risultati senza impegnarsi nel controllo manuale o elettronico delle funzioni della casa. La regolazione climatica dipende semplicemente dall'utilizzo di un comune timer per la programmazione dell'impianto termico e dalla eventuale regolazione della veneziana di poche finestre.

Nel 2004 il progetto ha partecipato al “Bando per interventi Strategici e Dimostrativi in Campo Energetico” della Regione Piemonte, rivolto ad interventi impiantistici significativi.

Unico progetto di un intero edificio partecipante a quell'edizione, è stato ritenuto dimostrativo dalla Regione e premiato con il 4° posto nella classifica di merito. Ha ottenuto un significativo contributo a fondo perduto corrispondente al 40% delle spese “extra”necessarie, rispetto ad un edificio tradizionale, per il raggiungimento di elevate prestazioni energetiche.



2.0 ANALISI LCA DELLA CASA DI MOROZZO

2.1 Definizione obiettivi e campo di applicazione

2.1.1 La casa di Morozzo

Oggetto della ricerca è la villetta unifamiliare a basso consumo energetico descritta nel capitolo precedente, recentemente costruita nel comune di Morozzo, in provincia di Cuneo.

La progettazione, a cura dello “Studio Roatta Architetti”, è stata finalizzata all’ottenimento di un edificio caratterizzato da **ridottissimi consumi energetici** in fase d’uso ($10,38 \text{ kWh/m}^2$ all’anno di energia termica utile per riscaldamento) sfruttando il più possibile gli apporti solari passivi per coprire parte del fabbisogno energetico, minimizzando le perdite di calore verso l’esterno e gli ingressi di aria fredda non controllata verso l’interno.

L’abitazione, destinata ad abitazione privata unifamiliare, è attualmente in fase di completamento e si prevede che la fase d’uso possa iniziare entro fine 2007.

L’edificio è costituito da piano interrato, terreno e primo. I dati relativi alle dimensioni fisiche dell’involucro edilizio sono stati raccolti facendo riferimento sia alle tavole ed ai computi metrici del progetto esecutivo planimetrie e sezioni dell’edificio, sia alle informazioni raccolte su cantiere, entrambe fornite dal progettista.

2.1.2 La casa standard (edificio di riferimento)

Per poter confrontare le prestazioni energetico-ambientali di ciclo vita della casa di Morozzo rispetto ad un edificio convenzionale, è stato realizzato un secondo modello LCA in cui l’edificio è stato ri-progettato rispettando i requisiti minimi di legge. I consumi energetici in fase d’uso per il riscaldamento sono stato ri-determinati tenendo conto delle prescrizioni legislative del decreto legislativo 192/2005 successivamente modificato dal decreto legislativo 311/2006 (valido dal febbraio 2007) e, di conseguenza, l’involucro e gli impianti sono stati opportunamente trasformati.

2.1.3 Caratteristiche dell’edificio

- ✓ Periodo di occupazione: 70 anni
- ✓ Superficie calpestabile: 367 m^2
- ✓ Superficie riscaldata: 192 m^2
- ✓ Superficie utile, utilizzata al fine della determinazione dell’unità funzionale: 250 m^2 (somma della superficie riscaldata più $1/3$ della superficie del piano interrato)
- ✓ Volume lordo: $941,5 \text{ m}^3$
- ✓ Forma architettonica: corpo centrale più due maniche laterali
- ✓ Piano interrato: $174,41 \text{ m}^2$ suddivisi in 5 vani di cui 2 ad uso cantina ed 1 utilizzato come autorimessa.
- ✓ Piano terreno: $137,42 \text{ m}^2$ ripartiti come visibile in fig. 2.1.1
- ✓ Primo piano: 55 m^2 adibito a zona notte
- ✓ Abitanti: 4 persone

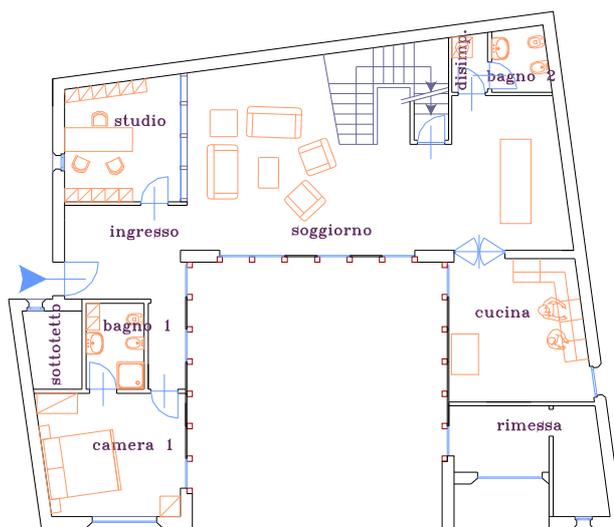


Figura 2.1.1 - Distribuzione dei locali interni del piano terreno [Fonte: Studio Roatta Architetti]

2.2 Confini di sistema e Unità funzionale

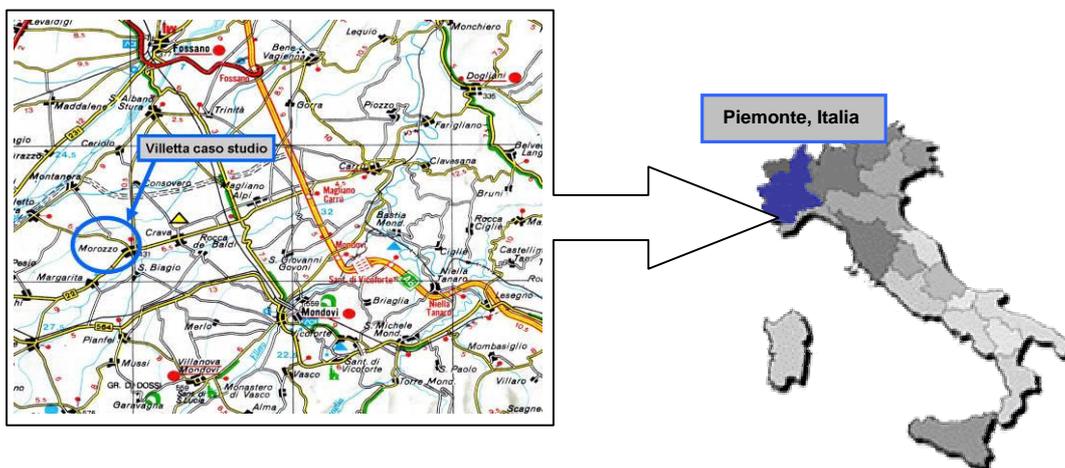
Nel modello LCA sono stati considerati i dati relativi alle seguenti fasi:

- Estrazione delle materie prime
- Produzione dei materiali costituenti l’involucro edilizio
- Trasporto dei materiali al sito di costruzione
- Costruzione dell’edificio
- Fase d’uso dell’edificio
- Demolizione dell’edificio
- Riciclaggio dei materiali / conferimento in discarica dei residui

L’analisi può definirsi del tipo “*dalla culla alla culla*” in quanto include anche il fine vita del “prodotto edificio” ed il riciclo dei materiali da costruzione.

Per quanto possibile il modello LCA è stato predisposto in modo tale da non effettuare esclusioni di materiali dell’involucro e dell’impiantistica.

Relativamente ai confini geografici del sistema l’edificio è ubicato in Piemonte, Italia, nel Comune di Morozzo, in Provincia di Cuneo (Fig. 2.2.1),



Dati della località						
Comune	Altitudine	Latitudine	Longitudine	Gradi giorno	Zona climatica	Durata convenzionale periodo riscaldamento
Morozzo (CN)	431 m slm	44°25' nord	7°42' est	2850	E	183 gg

Figura 2.2.1- Rappresentazione dei confini geografici del sistema e dati climatici della località

I siti di produzione e distribuzione della maggior parte dei materiali da costruzione utilizzati nella fase cantieristica sono distribuiti prevalentemente sul territorio del nord Italia ed in particolare i materiali a base cementizia vengono reperiti nella Provincia di Cuneo. Alcuni materiali da costruzione giungono in cantiere già assemblati, è il caso ad esempio di parte dell’impiantistica.

Per quanto riguarda la scelta dell’*Unità Funzionale* a cui riferire i risultati della ricerca, dall’analisi di altri studi LCA applicati agli edifici [Adalberth et al. 2001], si evince che il parametro preferibilmente adottato è il “m² di area utile”.

In questa ricerca, l’area utile è stata ottenuta sommandola superficie riscaldata dell’abitazione più un terzo della superficie del piano interrato.

Anche se ci possono essere limiti e controindicazioni, è stato scelto come unità funzionale **1 m² di superficie utile con orizzonte temporale di 1 anno**, poiché si ritiene che questo parametro permetta di paragonare in maniera oggettiva i risultati ottenuti dall’analisi con altri casi studio e sia utile per trarre conclusioni utili in future ricerche ed applicazioni.

2.3 Descrizione della Casa di Morozzo

Per la realizzazione del modello LCA l'edificio in esame è stato scomposto in due macro sistemi suddivisi a loro volta in unità costitutive, al fine di non tralasciare alcun dato o informazione, stimando i quantitativi dei materiali che verranno successivamente inseriti nel modello:

- ❖ **Involucro edilizio:** include tutte le componenti edilizie messe in opera per la realizzazione dell'involucro. Si prevede che possa avere un ciclo di vita pari a **70 anni**. La stima è stata fatta tenendo conto che si tratta di un'abitazione attualmente adibita a prima casa, includendo anche i normali interventi di manutenzione.
- ❖ **Impiantistica dell'edificio:** indica le componenti impiantistiche dell'edificio, riconducibili agli impianti elettrico, termico, di ventilazione, ed idrico-sanitario. L'impiantistica, grazie all'elevata qualità ed efficienza dei prodotti rispetto al panorama attuale, dovrebbe garantire una durata pari circa a **35 anni**. La durata in tale caso è legata più all'impianto stesso che al superamento tecnologico in termini di efficienza.

Le tabelle 2.3.1 e 2.3.2 sintetizzano rispettivamente i sottosistemi edilizi dell'involucro e degli impianti con i relativi materiali costitutivi.

Tabella 2.3.1 - Unità costitutive dell'involucro edilizio

UNITA' COSTITUTIVE	MATERIALI
FONDAZIONI	Massetto cementizio; Calcestruzzo e Ferri d'armatura (rete elettrosaldata e barre fino a 30 kg/m ³); PET
PIANO INTERRATO	Calcestruzzo e Ferri d'armatura; Sottofondo realizzato con massetto cementizio; Muratura interna in mattoni (leganti: malta e boiaccia di cemento); Pavimentazione in cemento; Impermeabilizzazione delle superfici verticali realizzata con l'impiego di prodotti cementiti tipo cemento osmotico
SOLAI e SCALE	Calcestruzzo e Ferri d'armatura; laterocemento; Ringhiere e scale in acciaio zincato
STRUTTURE PORTANTI	Mattoni e Malta; Calcestruzzo e Ferri d'armatura
MURI DIVISORI	Tramezzi formati da lastre di gesso con struttura in acciaio e rivestite da un materassino in fibra di legno
COPERTURA	Legno e listelli di abete; Pannello OSB; Carta tipo kraft; Lana di legno; Alluminio
TERRAZZO	Acciaio zincato; Pavimentazione in legno
INFISSI	Alluminio; HDPE; Legno multistrato; Vetro; Polistirene espanso; Legno di quercia; Legno pressato; Acciaio
RIVESTIMENTI INTERNI ED ESTERNI	Intonaco realizzato in Calce idraulica; Polistirolo Vernice; Sughero bruno; Piastrelle in monocottura
PAVIMENTAZIONE (interna ed esterna)	Sottofondo in massetto cementizio; Gres porcellanato impiegato nei bagni, cucina, interrato, disimpegno e rimessa; Listelli in legno per camere, studio, soggiorno, corridoi e ingresso Scala interna In Ardesia; Portico, davanzali e soglie in Pietra di Luserna

Tabella 2.3.2 - Elementi costitutivi dell'impiantistica dell'abitazione

IMPIANTI	MATERIALI
IDRICO-SANITARIO	Condotte fognarie e scarichi idrici in HDPE
	Condotte di distribuzione acqua potabile in HDPE e Alluminio
	Condotte pluviali in Acciaio inox
	Sanitari in Ceramica, Vetro e Acciaio
	Rubineria in Ottone cromato e PVC cromato
	Pannelli solari per la produzione di ACS in alluminio, Lana di roccia, Rame e Vetro
TERMICO	Serbatoio in Acciaio
	Impianto a parete in Polibutilene
	Pompa di calore in Aluzinc
ELETTRICO	Cavi elettrici in Rame, PVC e HDPE
VENTILAZIONE	Tubi di distribuzione in HDPE
	Scambiatore di calore in Aluzinc



Gli elementi costruttivi che maggiormente contribuiscono alla riduzione del consumo energetico sono principalmente l'attento isolamento termico, la bassa dispersione termica degli infissi e delle superfici vetrate, lo sfruttamento di tecnologie solari passive e la messa in opera di impianti con elevato grado di rendimento.

▪ **Isolamento termico**

L'involucro edilizio è termicamente isolato grazie alla tecnica di **rivestimento a cappotto** e grazie a serramenti a bassissima dispersione termica. L'isolamento a cappotto è stato realizzato con uno spessore di rivestimento di 10 cm sotto il pavimento, 15 cm fuori dalle pareti e 20 cm nella copertura con lo scopo di formare un involucro in grado di neutralizzare eventuali *ponti termici*, ovvero quei punti in cui si verificano delle possibili dispersioni di calore.

▪ **Distribuzione e proprietà delle superfici trasparenti**

Le superfici vetrate hanno una duplice funzione di sistemi passivi captanti l'energia solare e di isolamento termico per minimizzare le dispersioni di calore. Le superfici trasparenti sono realizzate in *vetro triplo* (spessore 4-6 mm ciascuno) con doppia intercapedine. I telai, di oltre 10 cm di spessore, sono caratterizzati da valori di trasmittanza compresi tra 1,22-1,65 W/m²K. Gli infissi dunque permettono buoni valori di trasmissione solare garantendo un elevato grado di isolamento termico. Le vetrate sono distribuite soprattutto sulla facciata esposta a Sud al fine di captare la maggior quantità di energia solare disponibile per illuminare e scaldare i vani interni. Nel lato a Nord invece le finestre presentano dimensioni molto ridotte e svolgono principalmente il ruolo di regolatori di luce e di aria.

▪ **Uso di fonti energetiche rinnovabili**

Nel caso in esame l'unica fonte energetica rinnovabile utilizzata è rappresentata dall'energia solare, captata da pannelli solari termici, allo scopo di soddisfare il fabbisogno di acqua calda sanitaria. I collettori solari sono in grado di trasformare l'energia solare in energia termica apportando una riduzione dei consumi energetici in fase d'uso.

L'edificio ospita 4 pannelli solari piani, ciascuno di 2 m² di superficie, montati in posizione orizzontale sulla tettoia del terrazzo presente al primo piano. I collettori installati presentano un elevato assorbimento energetico pari al 97% ed inoltre sono garantiti dal marchio ecologico "*Blazer Engel*" per l'alto rendimento energetico e l'utilizzo di materiali nobili e riciclabili.

▪ **Impianti ad alta efficienza energetica**

Gli impianti installati per realizzare un comfort adeguato all'interno dell'edificio, sono tutti di ultima generazione e quindi in grado di soddisfare elevate prestazioni energetiche.

Le dispersioni termiche per ventilazione sono molto ridotte grazie al recupero termico dell'impianto di ventilazione meccanica controllata: l'aria di ventilazione viene estratta dai bagni e dalla cucina per essere ricambiata con aria esterna. Quest'ultima entra attraverso un condotto, interrato, di 300 mm di diametro, preriscaldandosi stabilmente intorno ai 7-8° C in inverno.

L'aria esterna entra in uno scambiatore di calore in cui l'aria espulsa dall'abitazione (20° C) cede calore all'aria immessa per poter essere ridistribuita nei soggiorni e nelle camere da letto ad una temperatura di circa 17° C in inverno o un po' più alta in estate.

2.4 Le fonti per il reperimento dei dati di inventario

2.4.1 Fase di pre-uso

Per quanto riguarda i dati relativi ai materiali e ai consumi energetici della fase di pre-uso (fase relativa alla produzione, trasporto e messa in opera dei materiali di involucro e impiantistica), questi sono stati dedotti in parte direttamente in cantiere ed in parte facendo riferimento al computo metrico ed agli elaborati di progetto (“primary data”).

I dati relativi alla fase di pre-uso si riferiscono alle seguenti tipologie:

- quantità dei diversi materiali messi in opera e le relative percentuali di scarto dovute agli sfridi di lavorazione e ad eventuali danneggiamenti in fase di trasporto e in cantiere;
- trasporto dei materiali costituenti l’edificio dai siti di produzione/distribuzione fino al cantiere;
- consumi energetici quali l’alimentazione dei macchinari da cantiere, l’illuminazione e la movimentazione macchine nel sito.

Nelle tabelle 2.4.1.1-2-3 sono indicati per ogni unità di processo inclusa nel modello LCA dell’involucro edilizio, dell’impiantistica e della fase cantieristica la corrispondenza nelle banche dati utilizzate. Inoltre, è stato assegnato a ciascun materiale il tipo di rifiuto generato a fine vita dallo smaltimento, operazione necessaria per realizzare il modello LCA del relativo fine vita.

Tabella 2.4.1.1 – Fonti di dati relativi ai materiali da costruzione

Materiali Involucro Edilizio	Corrispondenza SimaPro	Fonte	Tipo di rifiuto
Sabbia	Gravel ETH S	ETH-ESU	Ceramics
Calcestruzzo	Concrete,normal,at plant	Ecoinvent	Ceramics
Ferri d'armatura	Reinforcing steel, at plant/ RER S	Ecoinvent	Steel for concrete
Magrone e Malta	“Cemento”, “Sabbia”, “Acqua”	-	Ceramics
Cemento	Portland cement strength class Z 42,4, at plant	Ecoinvent	Ceramics
Laterizi	Brick, at plant/RER S	Ecoinvent	Ceramics
Resina poliaccrilica	Acrylic binder, 34% in H ₂ O, at plant/RER S	Ecoinvent	Plastics
Acciaio	Steel, converter, low-alloyed, at plant/RER S	Ecoinvent	Steel
Alluminio	Alluminium, primary at plant/RER S	Ecoinvent	Alluminium
Legno travi massiccio	Sawn timber,hardwood,planet,air/klin dried,u=10% at plant/RER S	Ecoinvent	Wood
Legno massiccio	Sawn timber,hardwood,planet,klin dried,u=10% at plant/RER S	Ecoinvent	Wood
Legno truciolato	Particle board, indoor use at plant/RER S	Ecoinvent	Wood
Carta	Kraft paper, unbleached at plant/RER S	Ecoinvent	Paper
Lana di legno	Wood wool, u=20% at plant/RER S	Ecoinvent	Wood
Gesso	Gypsum ETH S	ETH-ESU	Inert (residual)
HDPE	Polyethylene, HDPE granulate at plant/RER S	Ecoinvent	Plastics
PE riciclato	Polyethylene terephthaete, granulate, bottle grate at plant/RER S	Ecoinvent	Plastics
Vetro	Flat glass, coated, at plant/RER S	Ecoinvent	Glass
Acciaio inox	Steel, converter,chromium steel 18/8 at plant/RER S	Ecoinvent	Steel
Polistirene	Polystyrene expandable at plant/RER S	Ecoinvent	Plastics
Intonaco	“Cemento”, “Sabbia”, “Acqua”	-	Ceramics
	Lime mortar, at plant		
Vernice	Acrylic varnish, 87,5% in H ₂ O, at plant/RER S	Ecoinvent	Ceramics
Polistirolo	Polystyrene foamslab at plant/RER S	Ecoinvent	Plastics
Sughero bruno	Cork slab, at plant/RER S	Ecoinvent	Wood
Gres porcellanato	Ceramics ETH S	ETH-ESU	Ceramics
Ardesia e Pietra	Stoneware I	IDEMAT	Ceramics
Piastrelle	Ceramic tiles, at regional storage	IDEMAT	Ceramics
Boiaccia di cemento	“Cemento”, “Acqua”	-	Ceramics

Tab 2.4.1.2 – Fonti di dati relativi ai materiali dell'impiantistica

Materiali Impianti	Corrispondenza SimaPro	Fonte	Tipo di rifiuto
Acciaio inox	Steel, converter, chromium steel 18/8 at plant/RER S	Ecoinvent	Steel
Acciaio	Steel low-alloyed, at plant/RER S	Ecoinvent	Steel
Ceramica	Sanitary ceramics, at regional storage	Ecoinvent	Ceramics
Vetro	Flat glass, coated, at plant/RER S	Ecoinvent	Glass
Ottone cromato	Brass, at plant	Ecoinvent	Coppers
PVC cromato	PVC high impact ETH S	ETH-ESU	Plastics
Alluminio	Alluminium, primary at plant/RER S	Ecoinvent	Alluminium
Alluminio tubi acqua	Alluminium, primary at plant/RER S	Ecoinvent	Inert (residual)
HDPE	HDPE B250	BUWAL 250	Plastics
Lana di roccia	Rock wool, at plant	Ecoinvent	Inert (residual)
Rame	Copper, at regional storage/RER S	Ecoinvent	Coppers
PVC	PVC B250	BUWAL 250	Plastics
Polibutilene	Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous, at plant/RESR S	Ecoinvent	Plastics
Aluzink	Alluminium, primary at plant/RER S	Ecoinvent	Alluminium
	Zinc for plating ETH S	ETH-ESU	

Tabella 2.4.1.3 – Fonti di dati relativi all'utilizzo di acqua, elettricità, mezzi di trasporto e mezzi d'opera

Unità di processo	Corrispondenza SimaPro	Fonte
"Acqua"	Tap water, at user/ RER S	Ecoinvent system
"Energia elettrica mix Italia"	Electricity, low voltage, at grid/IT S	Ecoinvent system
"Trasporto leggero su gomma"	Trasport, van < 3,5t	Ecoinvent system
"Trasporto pesante su gomma"	Truck 28 t B250	BUWAL 250
"Trasporto in nave"	Sea ship B250	BUWAL 250
Terra Movimentata con "Escavatore"	Excavation hydraulic digger	ETH-ESU 96

2.4.2 Fase d'uso

- i consumi energetici della villetta sono stati valutati a partire dallo studio condotto dal progettista sul fabbisogno energetico per il riscaldamento e per l'acqua calda sanitaria (ACS); la stima dei consumi relativi alla ventilazione è stata dedotta dalla potenza installata.
- i consumi derivanti dagli usi cucina e dagli usi obbligati sono stati inseriti nel modello LCA per completare l'analisi del ciclo di vita dell'edificio e comprendere la relativa importanza dei sotto-sistemi analizzati, nonostante esulino dall'analisi dei materiali da costruzione e non dipendano, almeno in prima battuta, dalla tipologia dei materiali utilizzati e dalle tecniche costruttive e di demolizione scelte. Tali consumi sono sintomatici delle abitudini dei fruitori dell'opera edilizia e possono variare in base all'efficienza degli impianti scelti. In mancanza di dati misurati, i consumi per l'uso cucina sono stati estrapolati dal Rapporto Energia e Ambiente 2005 dell'ENEA mentre i consumi derivanti dagli usi elettrici obbligati sono stati stimati con riferimento al Piano Energetico della Provincia di Torino del 1997
- si prevede che durante l'intera vita dell'abitazione vengano realizzati degli interventi di manutenzione; tuttavia questi non sono stati inseriti nei consumi della fase d'uso, ma bensì conteggiati nelle percentuali di efficienza di messa in opera dei materiali da costruzione.
- Acqua potabile esclusa dai calcoli in quanto non pertinente agli obiettivi dello studio.

L'unica fonte energetica impiegata nella fase d'occupazione della villetta a basso consumo energetico è l'energia elettrica, per la quale i relativi dati di inventario sono stati desunti dal database *Ecoinvent*. Nel modello dell'edificio standard sono stati utilizzati i dati di inventario relativi all'uso di metano per il riscaldamento, la produzione di ACS e l'uso cucina (Tab. 2.4.2.1).

Tabella 2.4.2.1 – Fonti di dati relativi all'utilizzo di gas naturale

Unità di processo	Corrispondenza SimaPro	Fonte
“Energia utile da metano”	Natural gas, burned in boiler condensing modulating < 100 kW/RER S	Ecoinvent system
“Metano uso cucina”	Heat gas B250	BUWAL 250

2.4.3 Fase di fine vita

Il modello del fine vita dell'abitazione in esame è ipotizzato a partire di una prima operazione di smontaggio ed allontanamento di alcune componenti edilizie prima dell'abbattimento dell'edificio con martelloni idraulici e pinze meccaniche e successivo trasporto ai siti di trattamento per il riciclaggio dei materiali, oppure presso la discarica come rifiuti non riutilizzabili.

Il disassemblaggio selettivo comporta dei consumi in termini di energia elettrica e di diesel, rispettivamente per alimentare gli attrezzi necessari allo smontaggio e per la movimentazione, all'interno del cantiere, delle componenti smontate.

Per quanto riguarda i consumi relativi alla fase di demolizione si è deciso, non avendo informazioni dirette, di fare riferimento ai valori dedotti da precedenti studi LCA.

I dati utilizzati nel modello sono stati verificati intervistando alcuni addetti operanti nel settore delle demolizioni. I mezzi sfruttati nella fase di fine vita sono i martelloni per demolire fisicamente la struttura e la pala meccanica per caricare le macerie sui mezzi di trasporto diretti ai diversi siti di trattamento. Essendo i martelloni idraulici montati su un escavatore, i consumi energetici possono essere assimilati ai consumi di un normale mezzo d'opera di questa tipologia: la maggior parte dei consumi è infatti dovuto agli spostamenti del mezzo, anziché all'azione del martellone.

I consumi energetici relativi all'abbattimento sono stati valutati inserendo come dato *input* in SimaPro i m³ di materiali demoliti dall'escavatore fornito dalla banca dati e già utilizzato in fase cantieristica, l'*Excavation hydraulic digger*.

Per ogni fase sono stati considerati:

- i consumi energetici di processo e di trasporto;
- i processi di riuso, riciclo e messa in discarica dei materiali/macerie.

Tabella 2.4.3.1 - Fasi del fine vita del caso studio con corrispondenze in SimaPro

Operazione	Mezzo utilizzato	Corrispondenza SimaPro
Disassemblaggio	Attrezzi	Electricity, low voltage, at grid/IT S
Movimentazione e caricamento materiali allontanati prima dell'abbattimento	Pala meccanica	Heat diesel B250
Trasporti pre-abbattimento (acciaio, alluminio e leghe, vetro, legno,rame e ottone, materiali vari)	Autoarticolato e Autocarro	Trasporto leggero/pesante
Abbattimento in cantiere	Martelloni	Excavation hydraulic digger
Caricamento delle macerie su autoarticolati	Pala meccanica	Heat diesel B250
Trasporti post-abbattimento: ferri (70%) e acciai, ceramici al frantoio, materiali vari (plastica, lana di legno, sughero,ecc) in discarica legno naturale (50%) al recupero termico	Autoarticolato e Autocarro	Trasporto pesante/leggero
Caricamento delle macerie su tramoggia	Pala meccanica	Heat diesel B250
Frantoio con recupero ferro e rame	Frantumatore a mascelle e separatore magnetico	Electricity, low voltage, at grid/IT S
Trasporto ferro (30%) e rame recuperati dal deferrizzatore	Autoarticolato e Autocarro	Trasporto leggero

2.5 Inventario della Casa di Morozzo

2.5.1 L'involucro edilizio

Si riportano di seguito le tabelle di sintesi dei dati di inventario inseriti nel modello, suddivisi in base agli elementi strutturali precedentemente individuati.

Fondazioni

- sottofondazione di 20 m³;
- ferro armature: non maggiore di 30 kg/m³;
- 311,83 m² armati con una rete elettrosaldata di diametro pari a 6 mm;
- guaina di polietilene riciclato, steso al di sopra della fondazione lungo tutta la superficie dell'abitazione.

Tabella 2.5.1.1 - Tipologia e quantità di materiali presenti nell'unità costitutiva delle fondazioni

FONDAZIONI	MATERIALI	Peso [t]
	Massetto cementizio	48
	Calcestruzzo 30	220
	PE riciclato	0,144

Piano interrato

Costituito da murature in elevazione in calcestruzzo, impermeabilizzazione, rampa di accesso all'autorimessa, travi e pilastri.

- peso specifico adottato per pannelli rete elettrosaldata: 2,25 kg/m²;
- laterizi con % di foratura superiore al 55%, peso unitario 1,7 kg, n°laterizi/m²: 44
- malta con spessore standard di 1 cm;
- impermeabilizzazione superfici verticali: avvenuta con l'impiego di prodotti cementizi tipo cemento osmotico (composizione: 76% sabbia, 20% leganti cementizi, 4% resina poliacrilica) additivato con elastomeri, applicata a parete in due mani a rullo di 1 mm ciascuna.

Tabella 2.5.1.2 - Tipologia e quantità di materiali presenti nel piano interrato

PIANO INTERRATO	MATERIALI		[t]
	Elementi portanti	Calcestruzzo 30	187
		Calcestruzzo 15	28,2
		Calcestruzzo 70	3,1
	Sottofondo	Massetto cementizio	16
	Muri interni	Mattoni	5,4
		Malta	1,4
	Pavimenti	Biacca di cemento	0,53
	Isolamento a parete	Cemento	0,18
		Sabbia	0,68
Resine poliacriliche		0,04	

Solai e scala interna

- solai in laterocemento di 25 cm di spessore, relativi al pian terreno e al primo piano;
- solette della scala interna da 12*100 cm realizzate in calcestruzzo armato;
- solai realizzati da *pignatte* posate per uno spessore di 20 cm e da un getto di calcestruzzo di 5 cm distribuito verticalmente (a separazione di gruppi da 50 cm circa di mattoni) e orizzontalmente (a ricoprire tutta la struttura);



- scala di collegamento tra i piani in calcestruzzo presente nella quantità calcolata facendo riferimento alla sezione verticale dell'edificio, misurando l'ampiezza delle scale, l'altezza dei gradini e l'estensione diagonale delle scale.

Tabella 2.5.1.3 - Tipologia e quantità di materiali presenti nel solaio

SOLAI + SCALA	MATERIALI		[t]
	Solette scale	Calcestruzzo 70	4
	Solai	Calcestruzzo	25
		Laterizi	26
	Scala	Massetto cementizio	4,8
	Ringhiere per scale	Acciaio inox	0,2

Strutture portanti

- murature perimetrali realizzate in blocchi laterizi semipieni di 20 cm di spessore;
- muratura interna realizzata in mattoni forati da 8 cm legati con malta bastarda (spessore: 1 cm)
- pilastri realizzati in calcestruzzo per una volumetria complessiva pari a 13 m³

Tabella 2.5.1.4 - Tipologia e quantità di materiali utilizzati nelle murature

STRUTTURE PORTANTI	MATERIALI		[t]
	Mattoni (esterno)		44,5
	Mattoni (interno)		8,7
	TOTALE		53,2
	Malta		2,2
	Pilastri	Calcestruzzo 70	31,8

Muri divisorii

Tramezzi formati da lastre di gesso (spessore 15 mm) con struttura in acciaio e rivestite da un materassino in fibra di legno di 12 mm di spessore e da un film in carta di 2 mm.

Tabella 2.5.1.5 - Tipologia e quantità di materiali utilizzati per i muri divisorii

MURI DIVISORI	MATERIALI		[t]
	Gesso		0,45
	Carta		0,07
	Acciaio		0,0618
	Lana di legno		0,048

Copertura

- tetto **ventilato**: il manto di copertura si distacca dallo strato isolante, creando un'intercapedine che permette ad un flusso omogeneo d'aria di circolare dalla gronda fino al colmo;
- lastra di alluminio disposta su una superficie totale di 217 m² a supporto della quale sono inclusi i seguenti elementi: legno di abete, pannello OSB, listelli in abete, carta kraft;
- isolamento in lana di legno, spessore 22 cm.

Tabella 2.5.1.6 - Tipologia e quantità di materiali presenti nella copertura

COPERTURA	MATERIALI		[t]
	Legno di abete		4,5
	Pannello OSB		1,344
	Listelli in abete		2,025
	Carta kraft		0,0924
	Lana di legno		3,92
	Alluminio		0,45

Terrazzo

- situato al primo piano e provvisto di tettoia per ospitare 4 pannelli solari posizionati orizzontalmente. La struttura, accessibile da una camera da letto e dal bagno, è realizzata in acciaio inox e pavimentata con tavole di legno di larice.

Tabella 2.5.1.7 - Tipologia e quantità di materiali presenti nel terrazzo

TERRAZZO	MATERIALI		[t]
	Acciaio inox		0,4
	Legno		0,17

Infissi

- tripli vetri con 2 intercapedini contenenti argon (superficie vetrata: 106 m²);
- telai in legno, alluminio e polietilene ad alta densità;
- dispositivi di regolazione dei flussi di luce e calore quali ad esempio tende e veneziane;
- portone scorrevole in ferro e portoncino d'ingresso in legno;
- 1 porta blindata; 5 porte interne; 13 porte interne di tipo ad anta e scorrevoli.

Tabella 2.5.1.8 - Tipologia e quantità di materiali presenti negli infissi

INFISSI Finestre e vetrate	MATERIALI		[t]		
	TELAI	HDPE		0,072	
Legno multistrato		1,2			
Alluminio		0,2	0,286		
VENEZIANE	Alluminio			0,086	
VETRATURA	Vetro (triplo)		4,32		
INFISSI Porte	PORTONCINO D'INGRESSO		Legno di quercia	0,051	
			Polistirene espanso	0,0045	
	PORTE INTERNE	Sopra-luce (n°2)	Legno pressato	0,0007	0,067
			Legno pressato	0,066	
		Porte (n°13)	Vetro	0,23	
	PORTE PIANO INTERRATO	Porte (n°5)	Legno pressato	0,12	0,125
		Porta blindata	Pannello di legno pressato	0,005	
Acciaio			0,047		

Rivestimento ed isolamento interno ed esterno

- isolamento esterno a cappotto realizzato fissando all'esterno delle pareti, tramite collanti e tasselli, dei pannelli coibenti che successivamente vengono rasati con una speciale colla ed armati con una rete in fibra di vetro alcali-resistente prima dell'applicazione finale dello spessore di rivestimento a protezione degli strati sottostanti;
- rivestimento esterno realizzato in sughero bruno con spessore pari a 15 cm;
- rivestimento interno del piano interrato realizzato in polistirolo con spessore 8 cm;
- rivestimento interno del piano terra realizzato in polistirolo con spessore 10 cm;
- in questa unità si considera ogni tipo di rivestimento, includendo anche l'intonaco, la vernice e le piastrelle a parete.

Tabella 2.5.1.9 - Tipologia e quantità di materiali utilizzati per il rivestimento

	MATERIALI		[t]
	RIVESTIMENTO interno	Intonaco di calce idraulica (compreso piano interrato)	
Polistirolo		0,4	
Bagni e cucina		Piastrelle in monocottura	0,45
Vernice		0,3	
Soletta P.T in polistirolo		0,42	
RIVESTIMENTO esterno	Sughero bruno		4,6

Pavimentazione

- pavimentazione in listelli di legno e in materiali ceramici caratterizzante la maggior parte dei vani dell'edificio;
- cortile interno pavimentato con calcestruzzo miscelato con inerti di porfido, posati su un letto di sabbia spesso 3-4 cm;

Tabella 2.5.1.10 - Tipologia e quantità di materiali impiegati per la pavimentazione

	MATERIALI		[t]
	PAVIMENTI	Massetto cementizio	
Gres porcellanato		4,6	
Listelli di legno		2,55	
Ardesia		0,76	
Pietra di Luserna		0,97	



2.5.2 L'impiantistica dell'edificio

Si riportano di seguito le tabelle contenenti le stime dei materiali dell'impiantistica incluse nel modello LCA. Si ricorda che la stima della vita utile degli impianti è di 35 anni, perciò tutti i dati relativi ai materiali degli impianti sono stati raddoppiati. Le tabelle che seguono contengono dunque i quantitativi dei materiali degli impianti con riferimento all'orizzonte temporale di 70 anni.

Impianto idrico-sanitario

- tubazioni, raccordi e collettori per la distribuzione di acqua fredda e calda;
- tubazioni in polietilene ad alta densità (HDPE);
- sanitari in ceramica per i quali è stato possibile determinare il peso complessivo del materiale costituente;
- rubinetteria: i dati relativi ai pesi sono stati dedotti in maniera diretta, presso diversi negozi di arredo bagni e tramite schede tecniche fornite dai produttori;
- collettori solari disposti orizzontalmente sulla tettoia al primo piano per garantire il fabbisogno di acqua calda sanitaria;
- pompa di calore per il fabbisogno di acqua calda sanitaria solamente in situazioni eccezionali, di cielo coperto a temperature inferiori a 0°C per 4-5 giorni consecutivi.

Tabella 2.5.2.1 *Materiali dell'impianto idrico-sanitario*

IMPIANTO IDRICO-SANITARIO	MATERIALI	[kg]
	Acciaio	7
	Acciaio inox	134
	Ceramica	351
	Vetro	115,6
	HDPE	144,5
	Alluminio	89,9
	Lana di roccia	48,4
	Ottone cromato	18,7
	Rame	8
PVC cromato	1,4	

Impianto elettrico

Sono stati stimati il rame e le guaine degli impianti elettrici, così come le canaline corrugate di polietilene (diametro variabile tra 16 e 30 mm) in cui i cavi elettrici sono inseriti.

Tabella 2.5.2.2 *Materiali dell'impianto elettrico*

IMPIANTO ELETTRICO	MATERIALI	[kg]
	Rame	45,3
	PVC	24,7
HDPE	50	



Impianto termico

- l'impianto termico (a parete) utilizza l'acqua proveniente dal serbatoio in acciaio con capacità di 750 litri, caratterizzato da buona stratificazione della temperatura;
- impianto radiante a parete: pannelli modulari pre-assemblati con tubi in polibutilene altamente flessibili disposti su una superficie scaldante pari a 70,8 m²;
- pompa di calore: compressore a spirale, montato in una struttura portante in lamiera "aluzink", costituita da alluminio, zinco e silicio.

Tabella 2.5.2.3 *Materiali dell' impianto termico*

IMPIANTO TERMICO	MATERIALI	[kg]
	Acciaio	290
	Aluzink	150
	Polibutilene	56,3

Impianto di ventilazione

- l'aria di rinnovo viene prelevata dall'esterno attraverso una centrale termica che evita il rientro di radon e di odori dal terreno; l'aria scorre in tre tubazioni corrugate in HDPE fino al recuperatore di calore dal quale partono tubazioni di mandata e di ritorno che si sviluppano all'interno dell'edificio;
- scambiatore di calore è alimentato a corrente elettrica, lavora prelevando calore dal flusso di aria viziata, proveniente dai locali, cedendolo al flusso di aria di rinnovo, proveniente dall'esterno.

Tabella 2.5.2.4 *Materiali dell' impianto di ventilazione*

IMPIANTO DI VENTILAZIONE	MATERIALI	[kg]
	HDPE	93,8
	Aluzink	35

2.5.3 Fase cantieristica

Nella fase cantieristica sono stati considerati scarti e sfridi relativi alla messa in opera dei materiali da costruzione attraverso l'impiego di un **fattore di efficienza** (di messa in opera) variabile tra il 90% e il 97% per ciascun materiale in base al quantitativo di sfrido che esso può generare: in particolare le perdite più elevate in fase di cantiere sono relative ai materiali più fragili sia per la loro stessa natura che per il tipo di lavorazione che devono subire, basti pensare ai mattoni o alle piastrelle. È necessario precisare che i valori di efficienza attribuiti ad ogni materiale edilizio comprendono due contributi:

- gli sfridi relativi sia al sito di produzione, sia al cantiere;
- le quantità di materiali da costruzione necessarie per la manutenzione della struttura.

Dunque si è opportunamente incrementata la stima dei materiali trasportati in cantiere tenendo conto dei quantitativi aggiuntivi per le operazioni di manutenzione quali ad esempio, il rifacimento della facciata o la ristrutturazione interna o esterna di alcune parti dell'abitazione.

Nelle tabelle 2.5.3.1 e 2.5.3.2 sono riassunte per ciascun materiale dell'involucro e dell'impiantistica i dati relativi ai trasporti ed alle percentuali di efficienza stimate. Per quanto riguarda l'approvvigionamento dei materiali, si fa presente che mentre i materiali di natura cementizia e i laterizi provengono da siti non molto distanti dal cantiere, i materiali utilizzati negli infissi o negli impianti sono trasportati per distanze maggiori.

Tabella 2.5.3.1 – Materiali involucro: *Distanza dei siti produttivi/distribuzione dal cantiere, tipo di trasporto, efficienza di messa in opera e relative perdite di processo*

Materiali Involucro	Trasporto [km]	Tipo di trasporto	Efficienza [%]	Scarti [t]
Calcestruzzo	8	Truck, 28 t B250	96	19,77
Ferri d'armatura	20	Truck, 28 t B250	95	0,31
Massetti cementizi	8	Truck, 28 t B250	96	3,37
Sabbia	8	Truck, 28 t B250	90	0,07
Laterizi	20	Truck, 28 t B250	96	3,38
Malta	30	Transport, van < 3,5 t	94	0,21
Alluminio	100	Truck, 28 t B250	95	0,04
Legno	80% da 450 20% da 70	Truck, 28 t B250 Transport, van < 3,5 t	96	0,47
Carta	30	Transport, van < 3,5 t	95	0,01
Lana di legno copertura	450	Truck, 28 t B250	97	0,12
Gesso	80	Transport, van < 3,5 t	95	0,02
PE riciclato	100	Transport, van < 3,5 t	93	0,01
Vetro	1000	Truck, 28 t B250	95	0,23
Acciaio inox	50	Truck, 28 t B250	95	0,03
Intonaco	30	Truck, 28 t B250	90	2,42
Vernice	50	Transport, van < 3,5 t	90	0,03
Polistirolo	100	Transport, van < 3,5 t	96	0,02
Sughero bruno	2000	Sea ship B250	95	0,23
Gres porcellanato	350	Truck, 28 t B250	95	0,23
Ardesia	100	Transport, van < 3,5 t	95	0,04
Pietra di Luserna	50	Transport, van < 3,5 t	95	0,03
Piastrelle monocottura	330	Truck, 28 t B250	95	0,02
	20	Transport, van < 3,5 t		
Boiaccia di cemento	30	Transport, van < 3,5 t	97	0,02
Cemento	30	Truck, 28 t B250	96	0,01
Resine poliaccriliche	100	Transport, van < 3,5 t	Escluse dal conteggio dell'efficienza poiché presenti in modeste quantità	
HDPE, Polistirene	100	Transport, van < 3,5 t		
Acciaio	50	Transport, van < 3,5 t		



Tabella 2.5.3.2 – Materiali impianti: *Distanza dei siti produttivi/distribuzione dal cantiere, tipo di trasporto, efficienza di messa in opera e relative perdite di processo*

Materiali Impianti	Trasporto [km]	Tipo di trasporto	Efficienza [%]	Scarti [kg]
Acciaio inox, Acciaio, Alluminio	100	Transport, van < 3,5 t	95	6,7+14,9+4,5
Vetro	100	Transport, van < 3,5 t	97	3,5
HDPE, PVC	100	Transport, van < 3,5 t	92	23,1 + 2
Rame	100	Transport, van < 3,5 t	93	3,7
Polibutilene	100	Transport, van < 3,5 t	97	1,7
Ceramica	350	Transport, van < 3,5 t	Escluse dal conteggio dell'efficienza poiché presenti in modeste quantità	
Ottone cromato	200	Transport, van < 3,5 t		
Lana di roccia	100	Transport, van < 3,5 t		

I consumi energetici in fase di realizzazione dell’abitazione sono essenzialmente relativi all’energia elettrica, necessaria ad alimentare le macchine da cantiere e per l’illuminazione, e al gasolio consumato per l’alimentazione degli escavatori.

I consumi energetici sono stati valutati avendo a disposizione i seguenti dati:

- Terra movimentata pari a 1036,8 m³.
- Impiego di 2 Mini Escavatori.

La totalità delle informazioni a disposizione (tabella 2.5.3.3) è stata raccolta in maniera diretta dagli addetti operanti nel cantiere stesso.

Tabella 2.5.3.3 - *Consumi energetici e di acqua potabile relativi alla fase costruttiva.*

Consumi cantieristici	Impiego	Quantità
Energia elettrica	Alimentare macchine da cantiere e illuminazione	2556 [MJ]
Macchine movimentazione terra	Alimentazione macchine di scavo	1036,8 [m³]

2.5.4 Fase d’uso

Per la stima dei consumi energetici nella fase d’uso sono stati distinti i consumi che dipendono dalla metratura dell’abitazione dai consumi tipicamente riconducibili al nucleo familiare, che non subiscono, almeno in prima battuta, variazioni significative al variare della metratura dell’abitazione (Figura 2.5.4.1).

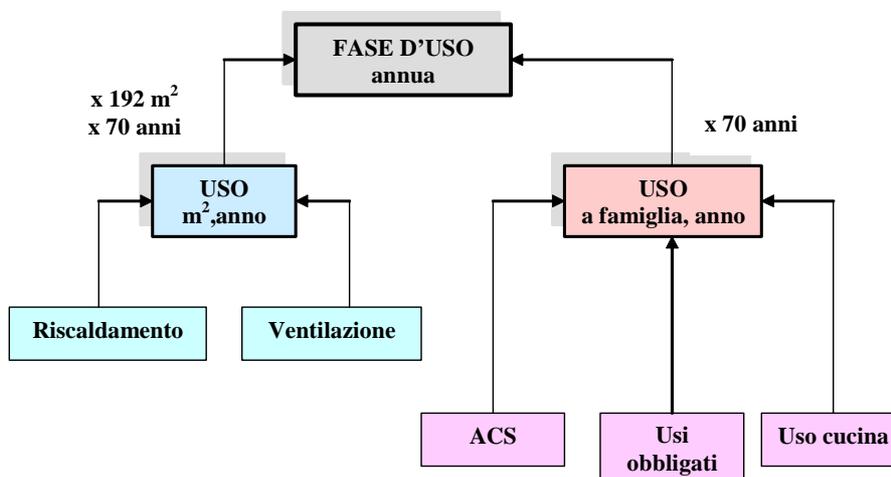


Figura 2.5.4.1 – *Inquadramento dei consumi energetici in fase d’uso*



L'analisi è comprensiva dei seguenti dati input per quanto concerne i consumi energetici in fase di occupazione dell'abitazione (70 anni).

- Il **fabbisogno di energia utile** dell'intero edificio considerato per la effettiva stagione di riscaldamento è di 7169 MJ/anno, che corrispondono a **10,38 kWh/m² all'anno**. (superficie riscaldata 192 m²). Il fabbisogno è stato calcolato secondo la norma UNI EN 832, tenuto conto di un ricambio d'aria di 0.5 V/h e di un mantenimento continuato della temperatura interna dell'edificio a 20°C.
L'impianto termico a bassa temperatura, la gestione scorrevole delle temperature di mandata, il funzionamento ad inverter della pompa di calore, il COP (coefficient of performance) elevato anche in condizioni di lavoro estreme (COP=2.54 con tW=+50°C, tA=-15°C), portano a stimare un rendimento di produzione medio stagionale $\eta_{Ps}=3.02$ ed un rendimento globale medio stagionale (comprensivo dei rendimenti di regolazione, di distribuzione e di emissione) pari a $\eta_{G,s}=2.62$.
Di conseguenza il quantitativo di energia elettrica prelevata al contatore per il riscaldamento è di **3,96 kWh/m² all'anno**.
- Il valore relativo al consumo di energia elettrica dell'**impianto di ventilazione meccanica controllata** è stato dedotto tenuto conto di un suo funzionamento continuato (24 h/giorno) per tutta la stagione di riscaldamento (6 mesi/anno) con un assorbimento pari a 32W.
Il consumo annuo relativo alla ventilazione è quindi di 140 kWh/a pari **0,730 kWh/m²anno**.
- Il **fabbisogno di energia utile per la produzione dell'acqua sanitaria**, calcolato considerando un fabbisogno giornaliero di 50 litri a persona a 50°C (una differenza di temperatura dell'acqua di 37°C) e un numero di occupanti pari a 4, è di 10670 MJ/anno.
L'energia per la produzione dell'acqua sanitaria fornita dall'impianto solare (8 m² di pannelli) è di 10422 MJ/anno, mentre la quota fornita dall'impianto termico è di **248 MJ/anno**.
Considerando il valore del rendimento di produzione medio stagionale della pompa di calore ($\eta_{Ps}=3.02$), il prelievo di energia elettrica al contatore per la produzione di ACS è dunque di **22,8 kWh/anno**.
- Per inserire nel modello gli **usi elettrici obbligati**, sono state ri-elaborate le statistiche presentate nel Programma Energetico Provinciale della Provincia di Torino, relative al 1997, ipotizzando che possano essere estese anche alla Provincia di Cuneo. I dati contenuti nel Piano evidenziano un consumo elettrico per famiglia di 1796 kWh/anno. Tuttavia, il consumo relativo ai lavaggi (17% degli usi elettrici obbligati) è stato dimezzato rispetto a quanto riportato nel Piano, ipotizzando di coprire il 50% del relativo fabbisogno con l'acqua calda dei pannelli solari termici. Infatti, parte del fabbisogno energetico per il lavaggio domestico, derivante dall'uso della lavastoviglie e della lavatrice, può essere soddisfatto dall'energia solare, per temperature fino a 45°C-50°C, cioè per pre-lavaggi e lavaggi a bassa temperatura.
Complessivamente, quindi, i consumi imputabili agli usi elettrici obbligati sono stati stimati in **1646 kWh/anno**, prelevati al contatore.
- Per determinare i consumi energetici derivanti **dall'uso cucina** sono state utilizzate le statistiche del "Rapporto Energia e Ambiente 2005" a cura dell'ENEA, in base alle quali l'uso cucina corrisponde al 5,3% degli usi energetici nelle abitazioni, stimate in circa 52,5 GJ/anno (valore senza correzioni climatiche). Tale scelta deriva dall'impossibilità di effettuare un calcolo diretto dei consumi che caratterizzano l'intero arco di vita dell'edificio in esame; si è dunque optato per l'utilizzo dei consumi energetici medi italiani.

Poiché l'edificio oggetto di studio possiede una cucina di tipo elettrico a induzione, più efficiente dal punto di vista energetico rispetto alle cucine a gas, si è deciso di considerare il 70% del valore medio riportato dall'ENEA: effettuando i dovuti calcoli e le opportune conversioni si è ricavato un valore pari a **542,5 kWh/anno** di energia elettrica prelevata al contatore.

Si noti che l'uso cucina è stato incluso nel modello, contrariamente a quanto riscontrato nella letteratura scientifica LCA, poiché la realizzazione di una casa a basso consumo energetico come quella considerata, di fatto, obbliga all'utilizzo di energia elettrica, non potendo essere impiegate fiamme libere nei locali in assenza di adeguati fonti di aerazione che però penalizzerebbero l'isolamento termico dell'involucro.

I consumi relativi alla fase d'uso della casa a basso consumo energetico, sono riassunti nelle tabelle 2.5.4.1-2-3.

I valori inseriti nel modello LCA sono stati estrapolati dalle tabelle originali relative ai consumi energetici pubblicati nel "Rapporto Energia e Ambiente 2005" e negli elaborati del "Programma Energetico Provinciale della Provincia di Torino 1997".

Tabella 2.5.4.1 - Consumi energetici al m² suddivisi per funzione d'uso

Uso a m ² ,anno	Fonte energetica	[kWh/ m ² ,anno]
Riscaldamento	Energia elettrica	3,96
Ventilazione		0,73
tot		4,69

Tabella 2.5.4.2 - Consumi energetici per abitazione, suddivisi per funzione d'uso

Uso a famiglia	Fonte energetica	[kWh/anno]
ACS	Energia elettrica	22,8
Usi cucina*		542,5

* Fonte ENEA
(70% valore contenuto nel rapporto Energia e Ambiente '05)

Tabella 2.5.4.3 - Consumi energetici per abitazione, suddivisi per funzione d'uso

(Fonte: Piano Provinciale delle Provincia di Torino 1997)

Applicazioni domestiche	kWh/anno	Consumi (%)
REFRIGERAZIONE	583,5	35,4%
LAVAGGIO (50% dato Piano Prov. TO)	149,5	9,1%
ILLUMINAZIONE	360,0	21,9%
APPARECCHI ELETTRONICI	321,7	19,5%
FERRO DA STIRO	100,8	6,1%
ALTRE APPLIC. DOMESTICHE	100,0	6,1%
ALTRE APPLIC. NON DOMESTICHE	30,7	1,9%
Totale	1646,3	100,0%

2.5.5 Fine vita

Come si è detto, l'edificio oggetto di studio è attualmente in fase di completamento, perciò è stato possibile monitorare unicamente la fase cantieristica; tutte le informazioni sul fine vita sono delle ipotesi verosimili scelte in comune accordo con il Progettista, in base alla tipologia di edificio e facendo riferimento all'esperienza pregressa del Politecnico di Torino, nonché alla bibliografia.

La costruzione della struttura edilizia e la scelta tecnica degli impianti necessari per una gestione efficiente della fase d'uso, sono state condotte in maniera attenta e mirata alla riduzione dei consumi energetici. In base a queste considerazioni è realistico ipotizzare che lo stesso rigore progettuale dovrebbe essere applicato al fine vita in esame, prevedendo dei processi di demolizione volti a valorizzare il recupero/riciclo di alcuni materiali edili. Si è scelto, dunque, di procedere con il modello di una **demolizione selettiva** per allontanare alcune componenti strutturali prima di considerare l'abbattimento controllato dell'abitazione stessa.

La Figura 2.5.5.1 propone una rappresentazione schematica delle fasi previste nel modello LCA per la demolizione dell'edificio.

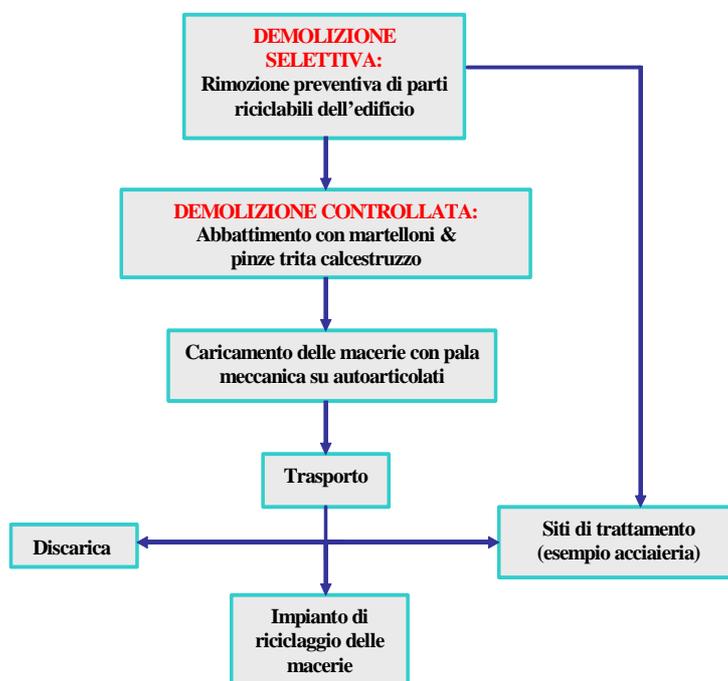


Figura 2.5.5.1 - Diagramma di flusso relativo alla fase di fine vita dell'edificio

1) Demolizione selettiva (De-costruzione + Selezione)

La demolizione selettiva prevede la de-costruzione dell'edificio, mirata alla separazione di frazioni di materiali per sottoporli a trattamenti che ne facilitino il reimpiego.

I rottami di ferro/acciaio subiscono un processo di riciclaggio finalizzato alla produzione di tondini d'armatura nell'elettroforno (*Electric Arc Furnace*). All'operazione di riciclaggio corrisponde un coefficiente di recupero dell'acciaio del 93%, dedotto da uno studio LCA condotto dall'*International Iron and Steel Institute* (Bromacombe et al. 2001) in cui vengono confrontati consumi/recuperi energetici ed impatti ambientali per produrre acciaio a partire dalla materia prima vergine e la produzione di acciaio a partire da rottami ferrosi. Da tale studio si ricava che la quantità di rottame di acciaio necessaria per produrre 1 kg di acciaio secondario è pari a 1,07 kg.

Durante la fase di demolizione selettiva viene allontanato e inviato al riciclo il 95% degli acciai speciali presenti nell'involucro e negli impianti; la restante parte sarà comunque inviata al riciclaggio, ma solo dopo l'abbattimento con i martelloni. I ferri d'armatura sono recuperati in seguito, dopo la demolizione.



Il legno utilizzato nell'involucro e nelle finiture è stato ricondotto alle tre categorie seguenti:

Legno travi: si tratta di legno massiccio di segheria, senza additivi o colle. Si trova nella copertura ed è facilmente recuperabile nella fase di disassemblaggio. Tuttavia, solo un recupero effettivo del 90% è stato considerato credibile;

Legno naturale: è legno di qualità, non presenta additivi o colle chimiche ma, essendo utilizzato soprattutto sottoforma di listelli, il suo recupero nella fase di demolizione selettiva non è semplice. Si stima che il 50% di tale tipologia possa essere smontato e riusato e l'altra metà venga destinata legna da ardere (ipotesi di termovalorizzazione domestica).

Legno multistrato (colla): raggruppa tutti i pannelli pressati e di tipo multistrato, all'interno dei quali c'è la presenza di colle che rendendo tale categoria inadatta al riuso. Dunque, nel modello tale tipologia di legno non viene disassemblata, ma destinata a discarica e/o al recupero termico.

La lana di legno della copertura viene riusata al 90%; la lana di legno dei muri divisorii e il sughero bruno, poiché presenti all'interno dei muri divisorii possono essere allontanati dal cantiere solamente dopo la demolizione e, di conseguenza, è verosimile dover ipotizzare il conferimento a discarica.

L'alluminio viene riciclato, a meno di una piccola quantità presente nei tubi di distribuzione dell'acqua (5%). I dati di inventario per tale processo sono stati reperiti nel database BUWAL B250, che considera, tra l'altro, una resa di recupero in materia del 95% circa. **L'aluzink** (lega di alluminio) viene totalmente riciclato mediante lo stesso processo previsto per l'alluminio.

Il vetro, prelevato dagli infissi e dai pannelli solari, è interamente riciclato, secondo un trattamento di rifusione. Il 40% del **rame** (e sue leghe) viene riciclato già nella fase di demolizione selettiva, mentre la restante parte sarà riciclata dopo l'abbattimento. Il rame secondario presenta le stesse caratteristiche fisiche e tecniche di quello primario perciò non presenta limitazioni d'utilizzo.

2) Demolizione controllata

Dopo aver rimosso alcune parti dell'edificio, è possibile procedere all'abbattimento della struttura utilizzando delle *macchine demolitrici dotate di martelloni idraulici e pinze meccaniche*.

Il consumo energetico relativo all'uso dei martelloni può essere assimilato al normale consumo di un escavatore in quanto l'azione del martellone ha un peso minimo rispetto ai consumi dovuti allo spostamento del mezzo.

Una volta abbattuto l'edificio, lo scenario che si presenta è caratterizzato da un insieme di macerie di diversa pezzatura ma di dimensioni tali da agevolare il caricamento sui mezzi di trasporto.

Il 70% dei **ferri d'armatura** viene recuperato direttamente sul luogo dell'abbattimento per essere direttamente inviato all'acciaieria dove viene rifuso; il restante 30%, viene estrapolato dalle macerie nella fase successiva di trattamento.

Il 100% del **legname** (esclusa la lana di legno e il sughero) presente dopo l'abbattimento viene recuperato e venduto come legna da stufa.

Il 50% delle **plastiche** recuperabili in questa fase vengono destinate in discarica poiché rappresentano una modesta quantità del totale delle macerie; il restante 50% essendo per la maggior parte annegato nell'intonaco o tritato nelle macerie, quindi difficilmente recuperabile in cantiere sarà sempre inviato in discarica, una volta estratto dalle macerie in seguito alle operazioni di trattamento.

3) Trattamento macerie

In seguito all'abbattimento, le macerie vengono caricate mediante una *pala meccanica* su di un *autoarticolato* per essere trasportate ai siti di trattamento e/o, in minor misura, in discarica.



Le macerie non hanno un fine vita comune in quanto alcune tipologie di materiali possono essere trasferite ad un impianto di trattamento per essere poi recuperate/riciclate oppure possono essere destinate direttamente alla discarica.

La categoria indicata nel modello LCA con la denominazione “**Calcestruzzi, materiali cementizi e ceramici**” è comprensiva di: calcestruzzo, cemento, i laterizi e malta legante, i rivestimenti interni ed esterni, la pavimentazione, i muri, la ceramica. In tale categoria rientrano anche i residui di ferro, legno e plastica rimasti annegati negli intonaci e nelle murature. Queste macerie vengono inviate presso un sito dotato di frantumatore a mascelle con un separatore magnetico, in modo tale da poter raccogliere i rottami ferrosi in cassoni ed inviarli all'acciaieria per la ri-fusione. Il resto delle macerie viene frantumato fino ad ottenere un aggregato riciclato utilizzabile per sottofondi stradali o riempimenti in sostituzione di aggregati da costruzione vergini.

Tale tipologia di macerie viene totalmente riciclata, tuttavia il materiale recuperato presenterà caratteristiche differenti da quello di partenza proprio perché in esso rimangono inglobati altri materiali (impurità) che lo rendono di qualità inferiore.

I rifiuti residui sono conferiti in discarica

Le due fasi di abbattimento dell'edificio e trattamento delle macerie sono schematizzate in Figura 2.5.5.2, mentre la tabella 2.5.5.1 definisce i consumi di energia intervenuti in tali fasi.

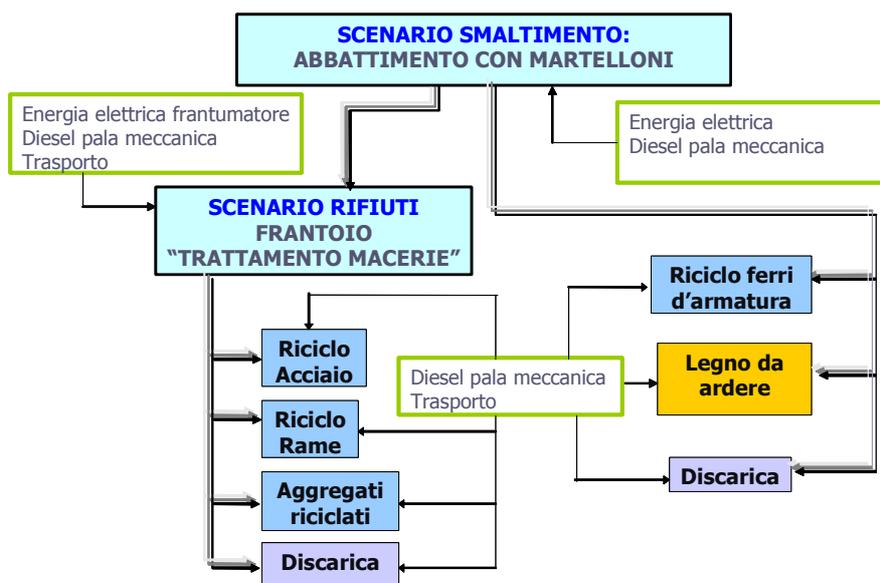


Figura 2.5.5.2 – Fasi del fine vita

Tabella 2.5.5.1 - Consumi energetici del fine vita

Consumi energetici	Funzione	Dati input
Attrezzi smontaggio: (energia elettrica)	Disassemblaggio selettivo	500 MJ
Martelloni: (uso escavatore ETH-ESU)	Abbattimento	0,5 m³/m³ demolito
Pala meccanica: diesel	Movimentazione macerie	6 MJ/t
Autoarticolato & Autocarro: diesel	Trasporto mcerie	20-30 t*km
Frantoio: energia elettrica	Trattamento macerie	1,344 kWh/t

La tabella 2.5.5.2 sintetizza le destinazioni ed i flussi percentuali dei vari materiali nelle 3 sotto-fasi del fine vita, precedentemente descritte.

Tabella 2.5.5.2 – Destinazioni di fine vita e flussi percentuali dei vari materiali

MATERIALE	% riuso/riciclaggio/messa a discarica			
	Fase 1 DEMOLIZIONE SELETTIVA	Fase 2 DEMOLIZIONE CONTROLLATA	Fase 3 TRATTAMENTO MACERIE	
Acciai	95% al riciclaggio	5% al riciclaggio		
Ferri d'armatura	-	70% al riciclaggio	30% al riciclaggio	
Calcestruzzi, materiali cementiti, ceramici	-	-	100% al riciclaggio e trasformazione in aggregati	
Legno	Legno travi copertura	90% al riuso	10% termovalorizzazione domestica	
	Legno naturale	50% al riuso	50%termovalorizzazione domestica	
	Lana legno copertura	90% al riuso		10% a discarica
	Lana di legno divisori	-	-	100% a discarica
	Sughero bruno	-	-	100% a discarica
Alluminio	95% al riciclaggio		5% al riciclaggio	
Aluzink	100% al riciclaggio			
Vetro	100% al riciclaggio			
Rame e leghe	40% al riciclaggio	60% al riciclaggio		
Plastiche	-	50% a discarica	50% a discarica	
Carta			100% a discarica	
Residui dopo il trattamento macerie	-	-	100% a discarica	

Seguono le rappresentazioni schematiche dei processi riciclaggio dei principali materiali con riferimento al bilancio di massa ed energia degli *input* e degli *output*.

NOTA METODOLOGICA

Si noti che nel modello LCA realizzato si è adottato il metodo dei cosiddetti “**AVOIDED PRODUCTS**” in base al quale ai processi di riciclaggio viene scalata l’evitata produzione dei corrispondenti prodotti vergini e dei conseguenti carichi ambientali. Tuttavia, poiché nel modello sono stati considerati non solo i benefici del riciclaggio, ma anche i carichi energetico-ambientali dei processi, nonché dei trasporti, l’analisi LCA consente di valutare i benefici e/o danni ambientali netti, risultanti dalla differenza tra impatti evitati meno impatti causati.

Acciai

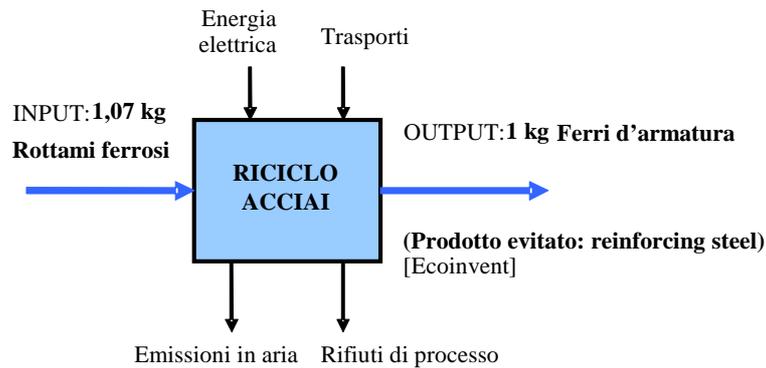


Figura 2.5.5.3 - Riciclo acciaio - input/output (Fonte: IISI)

Alluminio

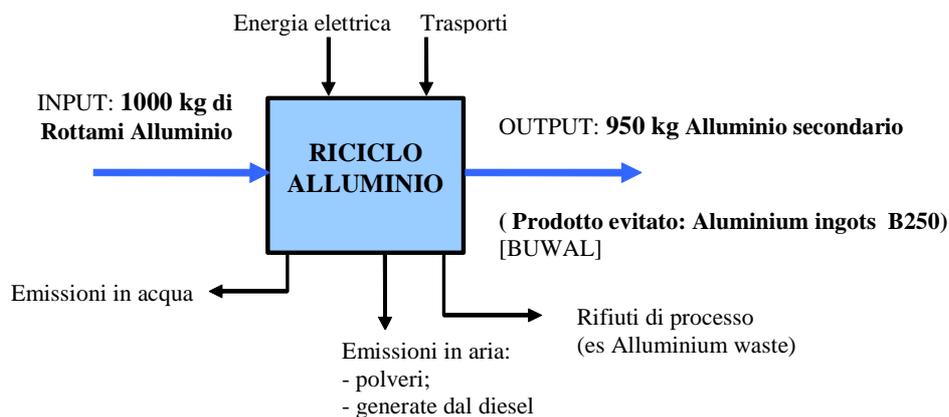


Figura 2.5.5.4 - Riciclo alluminio - input/output (Fonte: Buwal 250)

Legno

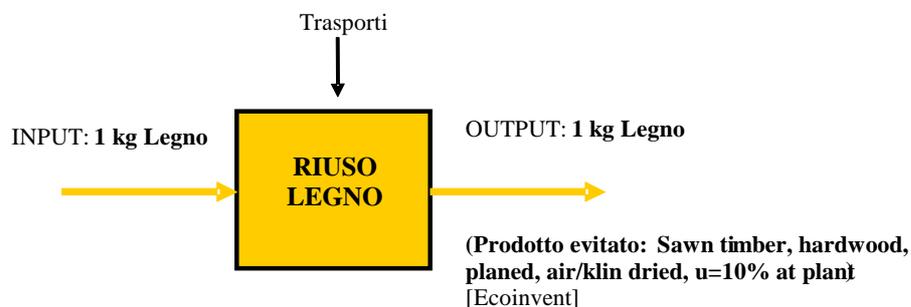


Figura 2.5.5.5 - Riuso legno - input/output

Nel modello considerato, il processo di riuso del legno corrisponde ad un “*avoided process*” perchè i quantitativi di legno recuperati a fine vita sostituiscono, a meno dei consumi derivanti dal trasporto, i quantitativi introdotti in fase di costruzione.

Vetro

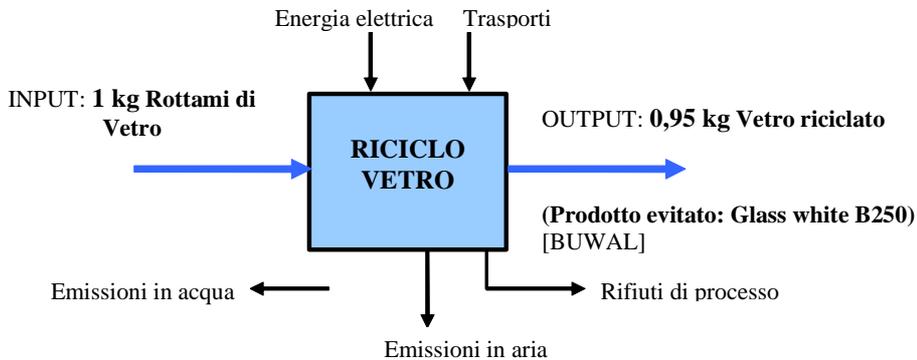


Figura 2.5.5.6 - Riciclo vetro - input/output (Fonte: Buwal 250)

Rame e leghe

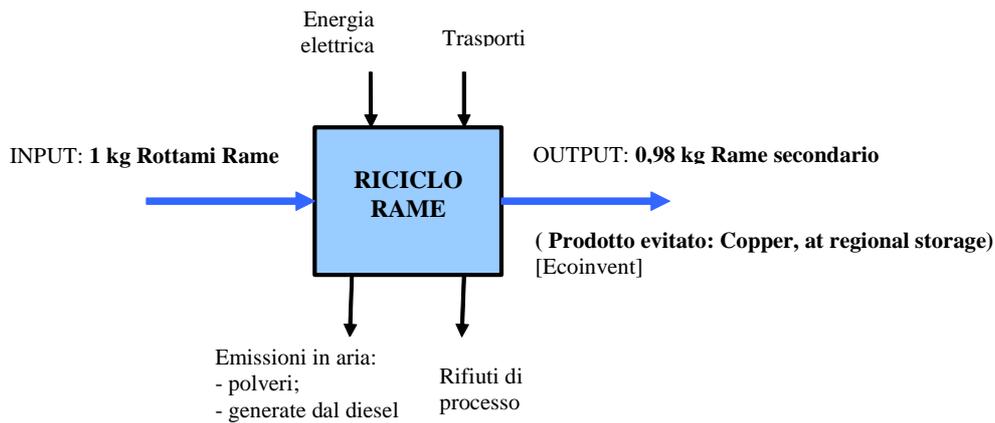


Figura 2.5.5.7 - Riciclo rame - input/output

Aggregati riciclati

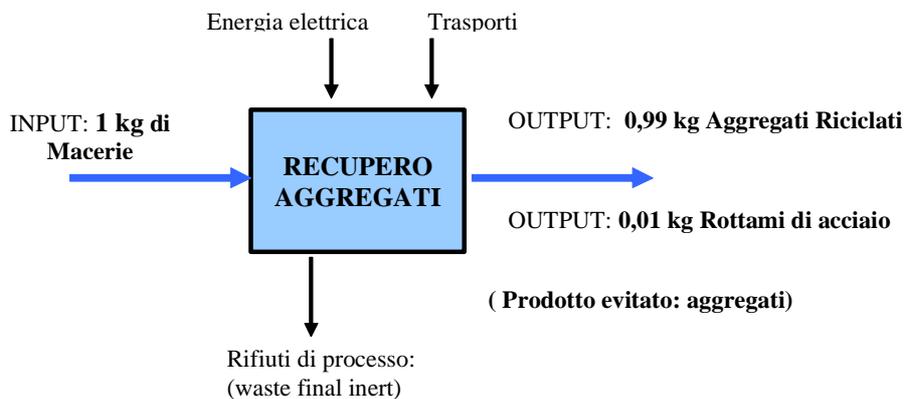


Figura 2.5.5.8 - Recupero inerti - input/output

2.6 Inventario della casa standard

Anche per la casa standard (termine di paragone fittizio per valutare i benefici ambientali effettivi della casa a basso consumo energetico) si è proceduto alla definizione dei quantitativi dei materiali/energie in gioco, in termini di variazioni rispetto all'edificio precedentemente analizzato.

2.6.1 Involucro e impiantistica

Come già anticipato, la casa a basso consumo energetico fin qui descritta, è stata ri-progettata con l'obiettivo di adattarla ad una tipologia edilizia standard, semplicemente conforme alla normativa vigente in materia di risparmio energetico (decreto legislativo 192/2005 successivamente modificato dal decreto legislativo 311/2006).

Ciò che principalmente differenzia la casa standard da quella a basso consumo energetico è lo spessore e la tipologia degli isolanti. In particolare variano gli spessori e i materiali di:

- ✓ Isolamento pareti perimetrali (da 15 cm di sughero a 4 cm di isolante sintetico)
- ✓ Isolamento copertura (da 22 cm a 4 cm di lana di legno)
- ✓ Isolamento soletta (da 10 cm a 3 cm di isolante sintetico)

Altra differenza tra le due soluzioni abitative riguarda la tipologia e la superficie dei componenti finestrati; questi infatti non sono più costituiti da tripli vetri, bensì da comuni doppi vetri, cambiamento che comporta anche una variazione nel conteggio dei km relativi al luogo di provenienza. Infatti, mentre i serramenti con tripli vetri sono prodotti in Germania, i doppi vetri, possono essere acquistati presso un rivenditore locale, evitando buona parte del trasporto (da 1000 a 200 km).

Per quanto riguarda la superficie vetrata complessiva, la casa standard è stata ridisegnata considerando un minor rapporto di tale superficie rispetto ai totali m² in quanto una così ampia superficie vetrata è tipica di un edificio a basso consumo energetico. Tale superficie è stata dunque ridotta a 35 m² contro i precedenti 100 m².

Di seguito sono sintetizzate le modifiche effettuate sulla casa standard in termini di elementi strutturali:

Tabella 2.6.1.1 Modifiche effettuate agli elementi strutturali della casa standard

Elementi strutturali	Materiali eliminati/sostituiti	Quantità [t]	Note
COPERTURA	Esclusa lana di legno	-3,96	Isolante tetto in lana di legno: da 22 cm passa a 5 cm
	Aggiunto polistirolo in sostituzione della lana di legno	+0,54	
	Escluso pannello OSB	-1,344	-
RIVESTIMENTO E ISOLAMENTO	Escluso sughero bruno pareti	-4,7	Isolante pareti: da 15 cm passa a 4 cm
	Aggiunto polistirolo in sostituzione del sughero	+0,31	
	Aggiunto polistirolo a pavimento	+ 0,17	Isolante pavimento a supporto delle tubazioni per il riscaldamento: spessore 3 cm
	Tolto polistirolo soffitto piano interrato	- 0,61	-
INFISSI	Sostituiti i tripli vetri con doppi vetri e diminuita la superficie vetrata complessiva	- 3,38	Superficie vetrata passata da 100 m² a 35 m²
	Diminuito quantitativo di alluminio (telai)	-0,15	Dovuto alla in seguito alla diminuzione della superficie vetrata complessiva
MURATURE ESTERNE	Aumentato il quantitativo di laterizi in conseguenza della riduzione della complessiva superficie vetrata	+11	-

In tabella 2.6.1.2. sono messe in evidenza le variazioni tra i modelli LCA dei due edifici analizzati.

Tabella 2.6.1.2 Tipologia e quantità di materiali impiegati nell'involucro dei due edifici considerati

Materiali Involucro Edilizio variati	CASA A BASSO CONSUMO [t]	CASA STANDARD [t]	Variazione
Laterizi	84,6	95,6	aumentato
Polistirolo	0,83	0,93	aumentato
Vetro finestre	4,32	0,94	diminuito
Legno	12,04	10,07	diminuito
Lana di legno	3,96	0	escluso
Sughero bruno	4,7	0	escluso
Alluminio infissi	0,2	0,05	diminuito

La casa standard presenta un totale quantitativo di materiali costitutivi dell'involucro pari a **730,2 t**.

I cambiamenti più evidenti si riscontrano nella sezione relativa all'impiantistica; oltre alle tecniche/materiali impiegati per l'isolamento termico dell'edificio.

Rispetto all'edificio a basso consumo energetico, la casa standard presenta le seguenti caratteristiche:

- ✓ I pannelli solari sono stati esclusi.
- ✓ L'impianto di ventilazione non è necessario e viene dunque escluso.
- ✓ Il serbatoio per lo stoccaggio dell'acqua calda viene eliminato mentre le tubazioni dell'impianto per il riscaldamento si considerano maggiorate di un fattore 4, in quanto l'abitazione necessita di un maggior apporto di calore nella stagione invernale. Tali impianti inoltre sono a pavimento anziché a parete.
- ✓ La pompa di calore, caratteristica dell'impianto termico, è integralmente sostituita da una caldaia a metano.

Di seguito sono sintetizzate le modifiche effettuate sulla Casa standard in termini di impiantistica:

Tabella 2.6.1.3 - Modifiche effettuate all'impiantistica della casa standard

Impianti	Elementi eliminati/sostituiti	Note
IMPIANTO TERMICO	Serbatoio	Escluso
	Impianti radianti per il riscaldamento	Aumentati impianti radianti in Polibutilene
	Pompa di calore	Rimasto invariato il quantitativo, però il materiale non si riferisce più alla pompa di calore ma alla caldaia che la sostituisce
IMPIANTO VENTILAZIONE	HDPE e Aluzink costitutivi dell'impianto	Eliminati integralmente
IMP. IDRICO-SANITARIO	Vetro, Alluminio, Lana di roccia, Rame costitutivi dei Pannelli solari	Eliminati integralmente

In merito ai quantitativi di materiali impiegati per l'impiantistica, si rilevano rispetto alla casa a basso consumo le variazioni riportate in tabella 2.6.1.4

Tabella 2.6.1.4 - Tipologia e quantità di materiali impiegati per l'impiantistica nelle due tipologie edilizie

Materiali Impianti	CASA A BASSO CONSUMO [kg]	CASA STANDARD [kg]	Note	Variazione
Acciaio inox	134	134	-	invariato
Acciaio	297	7	Tolto acciaio del serbatoio	diminuito
Ceramica	351	351	-	invariato
Vetro	115,6	70	Tolto vetro dei pannelli solari	diminuito
Ottone cromato	18,6	18,6	-	invariato
PVC cromato	1,4	1,4	-	invariato
Alluminio	89,9	27,9	Tolto alluminio pannelli solari	diminuito
HDPE	288,37	194,57	Tolto HDPE impianto ventilaz	diminuito
Lana di roccia	48,4	0	Tolto lana roccia pannelli solari	eliminato
Rame	53,29	45,29	Tolto rame dei pannelli solari	diminuito
PVC	24,7	24,7	-	invariato
Polibutilene	56,2	224,8	Moltiplicato per 4 il quantitativo di polibutilene	aumentato
Aluzink	185	150	Tolto imp. di ventilazione	diminuito

Il peso totale degli impianti nella casa standard è di **1249,3 kg** pari a **4,99 kg/m²**. Rispetto alla casa a basso consumo energetico il quantitativo di materiali per gli impianti diminuisce del 25%.

2.6.2 Fase d'uso

In osservanza del decreto legislativo 192/2005, successivamente modificato dal decreto legislativo 311/2006 (valido dal febbraio 2007), il fabbisogno di energia termica utile per riscaldamento è di 75697 MJ/anno, corrispondenti a **109,5 kWh/m², anno**.

Tale valore è stato calcolato dai progettisti considerando le nuove caratteristiche costruttive in termini di elementi strutturali e impiantistica, mediante l'utilizzo del software EDILCLIMA [EC501 - Edificio Invernale (L. 10/91) vers. 6].

Nel caso dell'edificio standard, una caldaia a metano a condensazione sostituisce la pompa di calore. Il rendimento di produzione medio stagionale è di $\eta_{Ps}=0,94$ Il rendimento globale medio stagionale (comprensivo dei rendimenti di regolazione, di distribuzione e di emissione) è pari a $\eta_{G,s}=0,87$. Di conseguenza, il consumo di combustibile è pari a 2482 Nm³/anno mentre quello di energia elettrica è di 300,6 kWh.

Tuttavia, nel caso del modello LCA della casa standard, i rendimenti di "filiera" (estrazione mineraria del gas, trasporto, distribuzione, produzione e distribuzione del calore) sono già tutti compresi nell'unità di processo individuata nel database Ecoinvent e quindi il dato da inserire nell'applicazione software SimaPro è il fabbisogno di energia utile (109,5 kWh/m²,a).

Si noti che, nel caso dell'edificio standard, la fonte energetica relativa al riscaldamento, alla produzione di ACS ed agli usi cucina è il metano anziché dall'energia elettrica.



L'assenza dei pannelli solari determina le seguenti variazioni:

- l'ACS è integralmente prodotta sfruttando la caldaia a metano; il consumo energetico è quindi maggiorato per andare a compensare i mancati apporti solari. Il fabbisogno di energia per la produzione dell'acqua sanitaria è di **10670 MJ/anno** (dato inserito nel modello LCA – stessa unità di processo utilizzata per il riscaldamento della casa standard).
- i consumi relativi ai lavaggi sono quelli del Piano Provinciale di Torino, senza l'apporto gratuito dei pannelli solari (**300 kWh/a**).

I consumi relativi all'uso cucina sono quelli del “Rapporto Energia e Ambiente 2005” a cura dell'ENEA (**775 kWh/a**).

Per quanto riguarda il consumo energetico relativo agli altri usi elettrici obbligati, il valore totale rimane invariato, in quanto indipendente dalle modifiche apportate.

Tabella 2.6.2.1- Sintesi variazioni apportate in fase d'uso

Funzione d'uso	Fonte energetica	Variazione
Riscaldamento	da En.elettrica a Metano	da 10,38* kWh m ² ,anno → 109,5* kWh m ² ,anno
ACS	da En.elettrica a Metano	da 248* MJ/abitaz.,anno → 10670* MJ/ abitaz.,anno
Lavaggi	En.elettrica	da 150** kWh abitaz.,anno → 300** kWh abitaz.,anno
Usi cucina	da En.elettrica a Metano	da 542,5** kWh abitaz.,anno → 774,6** kWh ab.,anno

* *fabbisogno energia utile* - ** *energia diretta*

2.6.3 Fine vita

Il fine vita della casa standard è del tutto simile a quello precedentemente descritto per la casa a basso consumo e con le stesse percentuali di recupero/riuso/invio a discarica precedentemente presentate.

Il modello LCA realizzato con SimaPro può gestire in modo automatico le diverse quantità di materiali impiegate nell'involucro e negli impianti, fornendo risultati proporzionati.

3.0 RISULTATI DELLO STUDIO LCA

3.1 Life cycle mass (*materiali di ciclo vita*)

Nel diagramma di Figura 3.1.1 si evidenzia la composizione ed il peso percentuale dei materiali costitutivi dell'involucro edilizio inclusi nel modello LCA della casa a basso consumo energetico. Si può notare che l'involucro in esame è caratterizzato per la maggior parte da materiali a base cementizia.

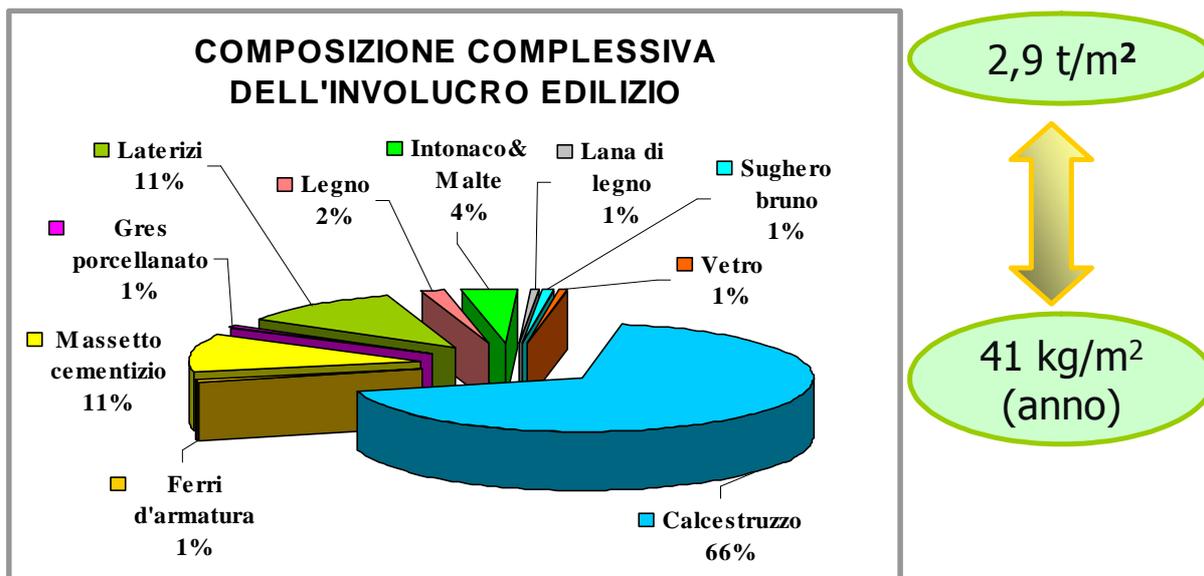


Figura 3.1.1 – Composizione dell'involucro edilizio della Casa di Morozzo

Nel diagramma di Figura 3.1.2 si evidenzia la composizione ed il peso percentuale dei materiali costitutivi degli impianti inclusi nel modello LCA della casa a basso consumo energetico. Si noti la maggiore eterogeneità dei materiali dell'impiantistica, rispetto alla composizione dell'involucro.

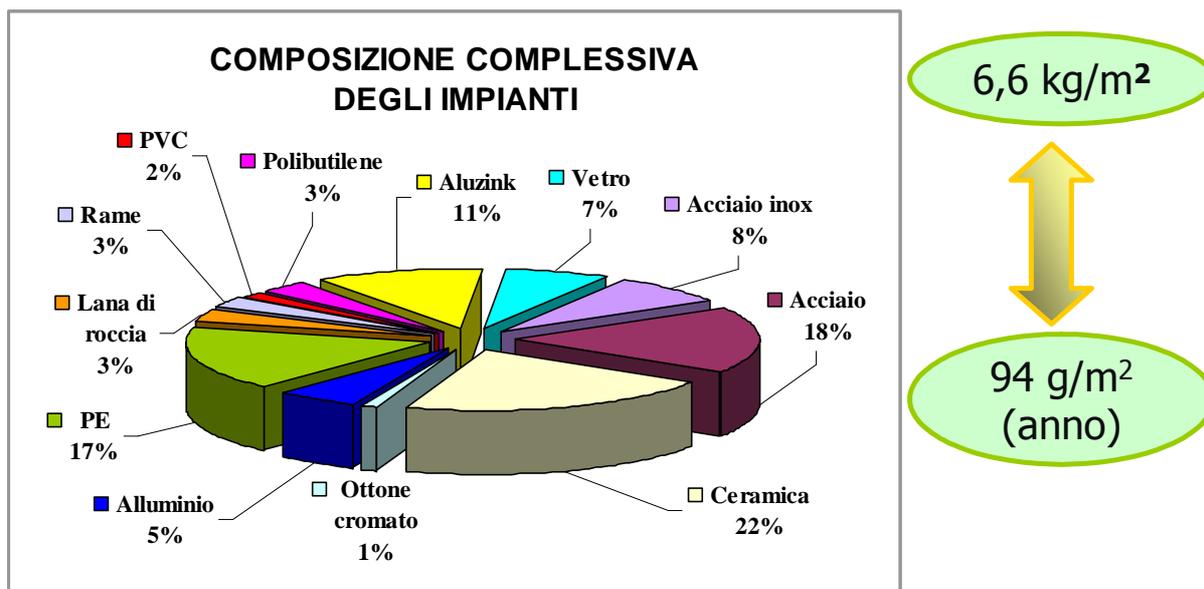


Figura 3.1.2 – Composizione e peso percentuale dei materiali costituenti l'impiantistica dell'edificio

Per quanto concerne il confronto tra casa a basso consumo energetico e casa standard, con riferimento ai **materiali dell'involucro** si hanno 733 t per la casa a basso consumo, contro 730 t per la casa standard. La tabella 3.1.1 e la Figura 3.1.3 sintetizzano le quantità dei materiali presenti nell'involucro delle due abitazioni. La tabella 3.1.2 e la Figura 3.1.2 si riferiscono agli impianti.

Tabella 3.1.1 – Confronto quantitativi di materiali impiegati nell'involucro delle due case [t]

Materiali Involucro Edilizio	CASA A BASSO CONSUMO [t]	CASA STANDARD [t]
Calcestruzzo	493	493
Ferri d'armatura	6,14	6,14
Massetto cementizio	84,2	84,2
Cemento	0,18	0,18
Sabbia	0,68	0,68
Laterizi	84,6	95,6
Malta	3,57	3,57
Resina poliaccrilica	0,04	0,04
Acciaio	0,10	0,10
Alluminio	0,74	0,59
Legno (tutte le tipologie)	12,04	10,07
Carta	0,16	0,16
Lana di legno	3,96	0
Gesso	0,45	0,45
HDPE	0,07	0,07
PE riciclato	0,14	0,14
Vetro	4,55	1,17
Acciaio inox	0,6	0,6
Polistirene	0,0045	0,0045
Intonaco	24,24	24,24
Vernice	0,3	0,3
Polistirolo	0,83	0,93
Sughero bruno	4,7	0
Gres porcellanato	4,6	4,6
Ardesia	0,76	0,76
Pietra di Luserna	0,97	0,97
Piastrelle in monocottura	0,44	0,44
Boiaccia di cemento	0,53	0,53
TOTALE [t]	732,6	730,2

Tabella 3.1.2 – Confronto quantitativi di materiali impiegati negli impianti delle due case [kg]

Materiali Impianti	CASA A BASSO CONSUMO [kg]	CASA STANDARD [kg]
Acciaio inox	134	134
Acciaio	297	7
Ceramica	351	351
Vetro	115,6	70
Ottone cromato	18,6	18,6
PVC cromato	1,4	1,4
Alluminio	89,9	27,9
HDPE	288,37	194,57
Lana di roccia	48,4	0
Rame	53,29	45,29
PVC	24,7	24,7
Polibutilene	56,2	224,8
Aluzink	185	150
TOTALE [kg]	1663	1249,3

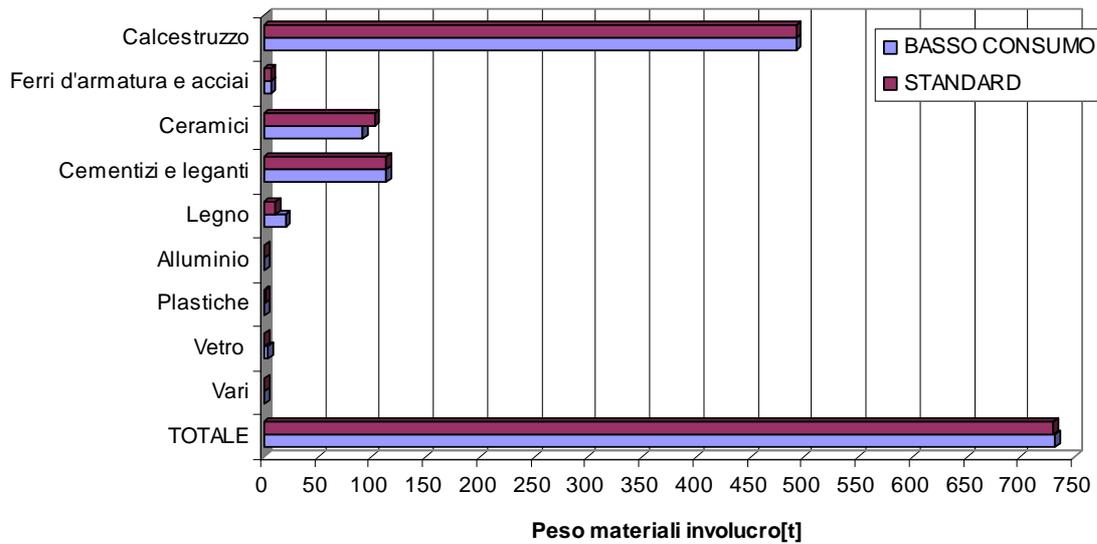


Figura 3.1.3 – Confronto quantitativi di materiali impiegati nell'involucro [t]

In riferimento invece ai **materiali costitutivi dell'impiantistica**, si hanno 1663 kg per la casa a basso consumo, contro 1249 kg per la casa standard. (Figura 3.1.4)

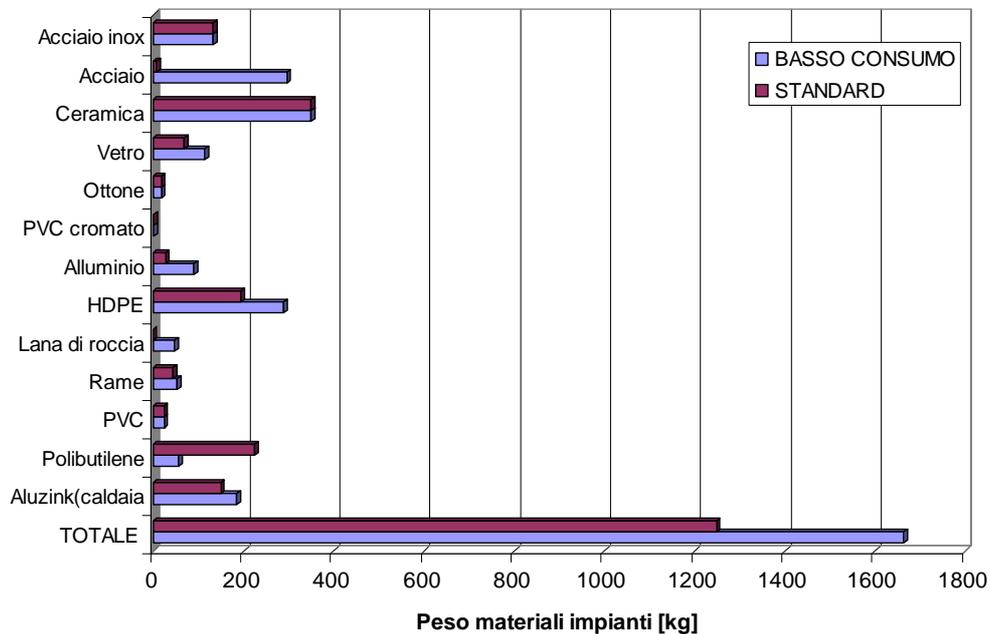


Figura 3.1.4 – Confronto quantitativi di materiali impiegati nell'impiantistica [kg]



3.2 Valutazione e interpretazione degli impatti di ciclo di vita

Gli impatti di ciclo vita sono stati calcolati con riferimento a due differenti livelli di aggregazione dei risultati ottenuti in fase di inventario:

- 1) in termini di caratterizzazione (GER, GWP; AP, ODP, ecc.);
- 2) in termini di pesatura e raggruppamento (Ecoindicator 99).

In questo report è dato maggior risalto ai risultati ottenuti in termini di impatti disaggregati (indicatori di categoria), con particolare risalto ai consumi energetici (GER) e all'effetto serra (GWP). Tuttavia, anche l'Ecoindicator 99 è utilizzato in modo da fornire una visione più ampia in merito ai vari aspetti ambientali considerati significativi per l'analisi. In ogni caso, poiché il modello LCA contiene informazioni disaggregate sarà possibile approfondire, in fasi successive della ricerca, l'analisi in funzione di specifici aspetti ambientali ritenuti interessanti.

NOTA METODOLOGICA

Si noti che nel modello LCA realizzato sono stati considerati diversi criteri per il conteggio delle emissioni di anidride carbonica da fonte biogenica. Infatti, in relazione ai materiali da costruzione di origine vegetale utilizzati nell'involucro, è necessario assegnare i crediti di biossido di carbonio, ovvero le quantità di anidride carbonica che le biomasse legnose sequestrano dall'atmosfera durante la fase di crescita.

Secondo la letteratura internazionale sono diversi i criteri adottabili.

Il primo criterio prevede l'assegnazione a priori del credito di CO₂ alla biomassa legnosa in ingresso al modello LCA, dopodichè, nella fase di fine vita tutte le emissioni di anidride carbonica, compresa quelle di origine biogenica, sono conteggiate nel calcolo dell'indicatore GWP, senza esclusioni.

Il secondo criterio non prevede l'assegnazione del credito di CO₂ a priori, ma nel fine vita le emissioni biogeniche di biossido di carbonio sono considerate neutre, da un punto di vista dell'effetto serra.

Il terzo criterio, quello adottato nella presente ricerca, prevede l'assegnazione a posteriori del credito della CO₂ alle sole biomasse che nel fine vita dell'edificio vengono ri-utilizzate ed il conteggio delle emissioni di biossido di carbonio da origine biogenica.

Si noti che i tre criteri portano allo stesso risultato, nel caso della realizzazione di un modello LCA rigoroso. Tuttavia, poiché nella realtà è necessario introdurre delle semplificazioni al modello LCA, è possibile, e probabile, che non tutte le emissioni/crediti legate al fine vita delle biomasse vengano conteggiate.

In sostanza, come spesso accade nelle applicazioni a casi reali, è possibile che il primo criterio porti all'assegnazione di crediti di CO₂ che poi non vengono "restituiti" nel fine vita, distorcendo i risultati dell'analisi.

Il criterio adottato in questa ricerca è invece il più conservativo, in quanto assegna i crediti di CO₂ solo a quelle biomasse che fungono da "cassaforte" di anidride carbonica, sequestrando permanentemente il biossido di carbonio.

In ogni caso, poiché il tema delle emissioni climalteranti di origine biogenica è dibattuto e controverso, i risultati dell'analisi LCA sono espressi sia in termini di GWP fossile che in termini di GWP fossile+biogenico conteggiato con il metodo dei crediti assegnati a posteriori (tabella 3.2.1.1). Tuttavia, nelle analisi di contributo, nei grafici/tabelle è fornito il valore della sola componente fossile del GWP (Global Warming Potential), rimandando a successive fasi della ricerca un'analisi di dettaglio anche sulla componente biogenica delle emissioni climalteranti.

3.2.1 LCIA: life cycle impact assessment

Per la visualizzazione del diagramma a blocchi del ciclo vita utilizzato nell'analisi si rimanda agli Allegati (Tavola grafica elaborata mediante SimaPro 7.1).

Di seguito sono presentati i risultati relativi agli impatti di ciclo vita ripartiti nelle fasi di pre-uso, uso e fine-vita, in termini di indicatori di categoria e in termini di impatti aggregati secondo il metodo di pesatura Ecoindicator 99.

Tabella 3.2.1.1 - Indicatori d'impatto ambientale di ciclo vita riferiti al m², all'anno

Indicatori	Unità di misura [relative al m ² ,anno]	Pre-Usò	Usò	Fine vita	TOTALE Ciclo Vita
GER	MJ	140	140	-42	239
ENR	MJ	95	125	-21	200
GWP fossile	kg CO₂ eq	8,8	8,3	-1,5	15,6
GWP fossile + bio (post credit)	kg CO₂ eq	8,8	8,3	-2,5	14,6
ODP	kg CFC-11 eq	8,9E-07	7,3E-07	-6,9E-07	9,2E-07
POCP	kg C₂H₄	5,7E-03	3,1E-03	-1,8E-03	7,0E-03
AP	kg SO₂ eq	3,5E-02	5,1E-02	-9,1E-03	7,6E-02
EP	kg PO₄³⁻ eq	4,7E-03	2,9E-03	4,5E-04	8,1E-03
ECOINDICATOR 99	single score	0,66	0,5	-0,17	1,01

Dall'analisi della tabella 3.2.1.1 è possibile trarre le seguenti considerazioni:

- A differenza dell'edilizia convenzionale, dove il consumo energetico in fase d'uso supera il 90% del valore di ciclo vita, nel caso studio esaminato le fasi di Pre-Usò e Usò si equivalgono in termini di GER (Gross Energy Requirement): 140 MJ/m², anno entrambe.
- La fase d'Usò resta il primo contributore ai carichi energetico-ambientali di ciclo vita solo in 2 indicatori su 8: energia non rinnovabile e acidificazione.
- La fase più energivora, in termini di energia non rinnovabile (ENR), è quella relativa alla fase d'Usò dell'edificio: 125 MJ/m², anno (si sottolinea che gran parte dell'energia rinnovabile in fase di Pre-Usò è attribuibile alle biomasse legnose utilizzate nell'involucro).
- Nel caso dell'energia totale (GER = diretta + indiretta + feedstock), il contributo di Pre-Usò ed Usò è praticamente lo stesso: 140 MJ/m²,anno.
- Per quanto riguarda tutti gli altri indicatori, il contributo della fase di Pre-Usò supera il contributo della fase d'Usò.
- In termini di effetto serra, il contributo della fase di Pre-Usò è maggiore di quello relativo alle fasi d'Usò: 8,8 kg CO₂eq/m², anno contro 8,3 kg, rispettivamente.
- In relazione al ciclo di vita dell'edificio, i materiali dell'involucro danno un contributo, in termini di GER, pari al 50%, contro il 6% dei materiali degli impianti.
- In termini di GWP (solo da fonte fossile), è utile sottolineare come i materiali dell'involucro e degli impianti siano responsabili del 53% del GWP di ciclo vita, pari a 8,35 kg CO₂ eq/m²,anno.
- L'impatto maggiore, imputabile alla fase d'Usò, è l'assottigliamento della fascia dell'ozono (ODP) pari al 80% del ciclo vita.
- La causa principale della formazione di smog fotochimico è rappresentata dai materiali necessari per realizzare l'involucro edilizio e gli impianti (76% di POCP di ciclo vita).
- La fase di Fine-vita presenta valori degli indicatori di segno algebrico negativo (tranne l'indicatore relativo all'eutrofizzazione), il che rappresenta un beneficio ambientale netto.

3.2.2 Analisi di contributo

Fase pre-uso

- I materiali messi in opera incidono per il 56%, in termini di GER, contro il 2,7% dei consumi imputabili al cantiere.
Tra gli Elementi Strutturali, la copertura (12% del GER di ciclo vita) e il rivestimento (10,6% del GER di ciclo vita) hanno il peso maggiore nel consumo di risorse energetiche; per quanto riguarda l'impiantistica invece, si può affermare che l'incidenza maggiore spetta all'impianto idro-sanitario con il 3,1% di GER ciclo vita.
- Se all'interno della fase di Pre-Usa si considerano i materiali messi in opera ("Edificio") e la costruzione dell'edificio stesso ("Cantiere"), i materiali dell'involucro incidono, in termini di GER, sulla fase di Pre-Usa per l'95%, il cantiere contribuisce soltanto con il 5%. Il cantiere genera impatti ambientali, sia attraverso i consumi energetici diretti (0,4% di GER di ciclo vita), sia tramite gli sfridi generati in tale fase (2,3% di GER di ciclo vita). Gli sfridi relativi all'involucro edilizio, incidono di più rispetto a quelli degli impianti, generando rispettivamente 5,2 MJ/m²,anno e 0,5 MJ/m²,anno di GER di ciclo vita. Elementi Strutturali ed Impianti concorrono entrambi alla formazione di impatti ambientali, ma in misura differente: i primi incidono sul GER di ciclo vita con 120 MJ/m²,anno, i secondi con 13,8 MJ/m²,anno.
- **Elementi strutturali**

All'interno degli Elementi Strutturali, è interessante attribuire ad ogni *unità costitutiva* dell'edificio il relativo carico ambientale; la tabella 3.2.2.1 e la Figura 3.2.2.1 evidenziano i valori degli indicatori d'impatto al m², all'anno, relativi agli Elementi Strutturali.

Tabella 3.2.2.1 - Indicatori d'impatto ambientale riferiti al m², all'anno, relativi agli elementi strutturali

ELEMENTI STRUTTURALI	GER (MJ)	ENR (MJ)	GWP fossile (kg CO ₂ eq)
Copertura	28,97	7,95	0,44
Fondazione	12,3	11,6	1,64
Infissi	12,7	9,41	0,6
Muratura Esterna	11,7	10,54	1,015
Muri Divisori	0,51	0,23	0,017
Pavimentazione	9,40	3,81	0,24
Piano Interrato	12,6	11,8	1,64
Rivestimento	23,3	15,4	0,96
Solai e scala	6,6	5,96	0,59
Terrazzo	2,4	1,68	0,10
TOTALE	120,6	78,8	7,3

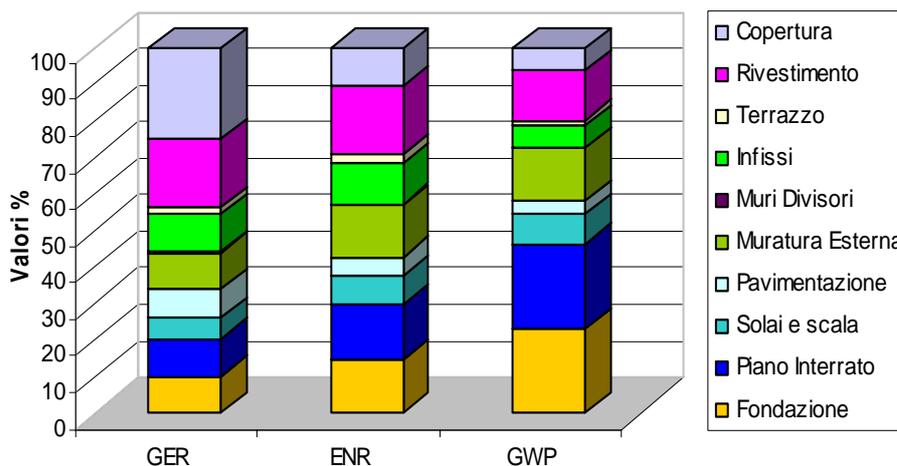


Figura 3.2.2.1 - Valori percentuali degli indicatori di categoria, riferiti al m², all'anno, relativi agli elementi strutturali

Da quest'ultima rappresentazione grafica, è possibile sottolineare che:

- ✓ In termini di GER, gli elementi strutturali più impattanti risultano essere la copertura e il rivestimento;
- ✓ La copertura presenta un elevato valore dell'indicatore GER ma il 74,6% del carico energetico proviene da fonti primarie rinnovabili.
- ✓ In termini di consumi energetici non rinnovabili, gli elementi strutturali che incidono di più sono il rivestimento, la fondazione ed il piano interrato;
- ✓ In termini di GWP, incidono maggiormente sugli impatti ambientali il piano interrato, la fondazione e la muratura esterna.

È interessante, a questo punto, approfondire l'analisi per determinare quali tipi di materiali presentino un maggiore contributo percentuale, in termini di indicatori di categoria, all'interno delle unità costitutive più importanti.

A titolo esemplificativo vengono sintetizzati in tabella 3.2.2.2 i valori di impatto relativi ai materiali impiegati nella copertura, che risulta essere l'elemento strutturale con carichi energetico-ambientali maggiori (vedere anche Figura 3.2.2.2)

Tabella 3.2.2.2 - Indicatori d'impatto ambientale riferiti al m², all'anno, relativi alla copertura

COPERTURA	GER (MJ)	ENR (MJ)
Carta	0,32	0,08
Alluminio	5,18	4,17
Lana di Legno	4,66	0,47
Legno Travi	10,32	1,43
Legno massiccio	5,15	0,74
Legno truciolato	3,30	1,03
TOTALE	28,97	7,94

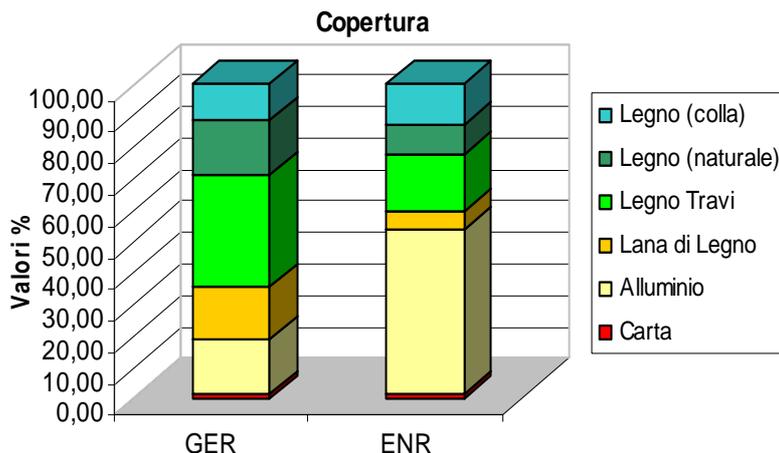


Figura 3.2.2.2 - Confronto in termini di GER e ENR, al m², all'anno, relativo alla copertura

Il legno ha una incidenza percentuale del 64,8% in termini di GER all'interno della copertura, percentuale che raggiunge l'80,9% se si considera anche la lana di legno.

L'indicatore di categoria ENR raggiunge il valore massimo di 4,17 MJ/m²,anno in corrispondenza dell'alluminio, pari al 52,5% dei consumi energetici non rinnovabili della copertura.

Analizzando gli elementi strutturali, che presentano maggiore impatto dal punto di vista del GER, si riscontra come l'incremento dei consumi energetici sia direttamente proporzionale ai quantitativi di materiali di tipo legnoso messi in opera.

Di seguito vengono illustrati i contributi relativi agli impatti generati dai materiali impiegati nella costruzione in termini di GER e GWP (figure 3.2.2.3-4) Per facilitare la rappresentazione grafica, i materiali usati per realizzare l'involucro verranno riuniti in gruppi omogenei: **Calcestruzzi; Ferri d'armatura e Acciai; Plastiche** (resina poliaccrilica, HDPE, PE, polistirolo e polistirene); **Ceramici** (laterizi, piastrelle, pietre ornamentali); **Cementizi & Leganti** (cemento, massetto cementizio, sabbia, boiaccia di cemento, malta, vernici e intonaco); **Legno e assimilabili** (lana di legno e sughero); **Alluminio; Vetro; Vari** (carta e gesso).

Un simile raggruppamento è effettuato per i materiali costitutivi dell'impiantistica (la voce Plastica unisce PVC, PVC cromato, HDPE e polibutilene)

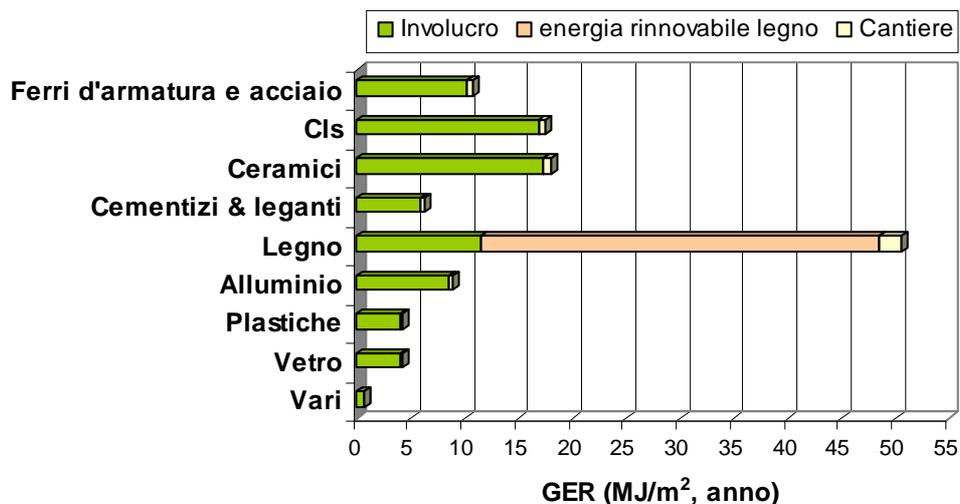


Figura 3.2.2.3 - Contributo dei materiali dell'involucro al GER

Si sottolinea che la quota di GER relativa alla categoria del legno, è per il 76,1% rappresentata dal contributo energetico rinnovabile.

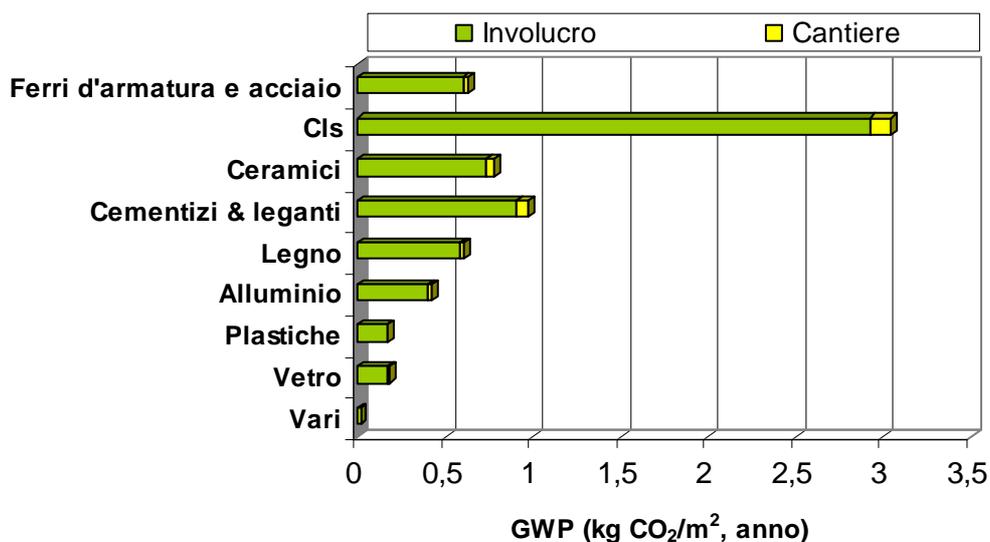


Figura 3.2.2.4 - Incidenza dei materiali dell'involucro sul GWP fossile

Le figure sopra riportate confermano i risultati già visti precedentemente per la copertura e la fondazione: la categoria che risulta avere il maggiore impatto per quanto concerne il consumo di risorse energetiche (GER) è quella relativa al legno, lana di legno e sughero, mentre il materiale che incide maggiormente sull'effetto serra (GWP) è il calcestruzzo. Bisogna però sottolineare che il carico energetico del legno è in maggior parte rappresentato da risorse energetiche rinnovabili (biomassa feedstock).

Per quanto riguarda la categoria del legno è interessante sottolineare che l'incidenza maggiore spetta al sughero bruno, con 14,57 MJ/m²,anno, seguito dal legno non trattato e dal legno delle travi presente in copertura, rispettivamente con 11,6 MJ/m²,anno e 10,3 MJ/m²,anno.

➤ Impianti

Gli Impianti incidono sugli indicatori di categoria in modo decisamente minore rispetto all'involucro edilizio; all'interno dei materiali impiegati per realizzare l'opera edilizia, contribuiscono in termini di GER, solamente con il 10% rispetto alla fase di Pre-Usa e hanno un peso del 5,7% sull'intero ciclo di vita dell'edificio.

L'impiantistica è caratterizzata da quattro tipi di impianti, i cui contributi all'impatto ambientale vengono raccolti nella tabella 3.2.2.4.

Tabella 3.2.2.4- Indicatori d'impatto ambientale riferiti al m², all'anno, relativi agli impianti

IMPIANTI	GER (MJ)	ENR (MJ)	GWP fossile (kg CO ₂ eq)
Imp. Elettrico	0,80	0,76	0,03
Imp. Idro-Sanitario	7,65	6,99	0,36
Imp. Termico	4,15	3,7	0,20
Imp. Ventilazione	1,41	1,31	0,05
TOTALE	14	12,77	0,64

All'interno dell'impianto Idro-Sanitario, l'incidenza d'impatto maggiore è relativa alla *ceramica* e ai pannelli solari, sia per quanto riguarda il GER, sia per il GWP.

I pannelli solari contribuiscono all'incremento degli indicatori di categoria soprattutto grazie all'*alluminio* di cui sono costituiti.



Nei grafici che seguono, si evidenziano i contributi agli impatti provenienti dagli Impianti, sia in termini di materiali impiegati, sia in relazione agli sfridi di cantiere prodotti.

I materiali usati per realizzare gli Impianti accorpati in gruppi con caratteristiche simili:

- 1 **Rame e leghe:** contiene il rame e l’ottone;
- 2 **Acciai:** raggruppa l’acciaio e l’acciaio inox;
- 3 **Plastica:** unisce PVC, PVC cromato, HDPE e polibutilene;
- 4 **Alluminio e leghe:** individua l’alluminio e l’aluzinc.

Per quanto riguarda il **vetro**, la **ceramica** e la **lana di roccia**, si è scelto di considerarli separatamente.

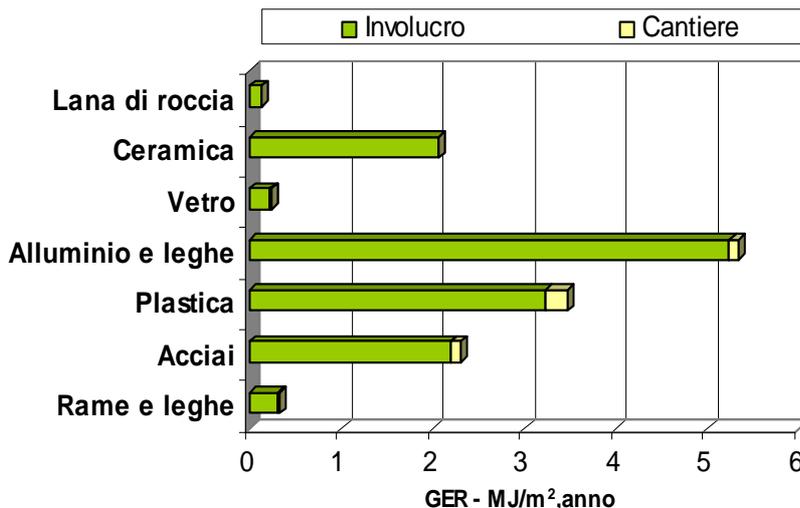


Figura 3.2.2.5 - Incidenza dei materiali degli impianti sul consumo di risorse energetiche

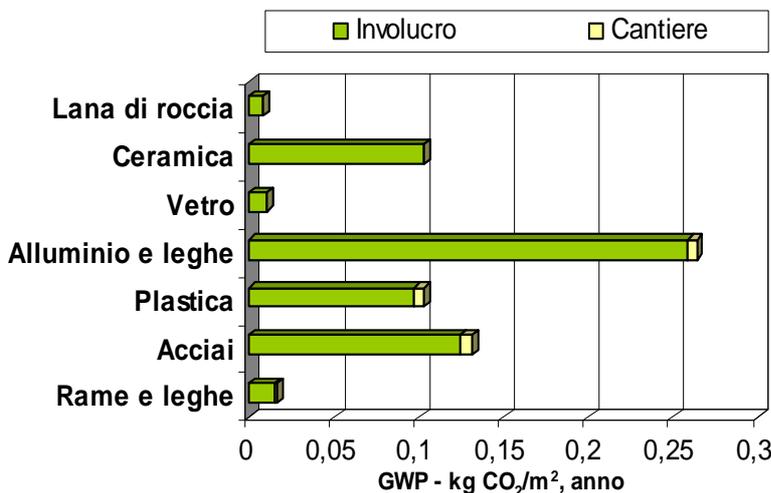


Figura 3.2.2.6 - Incidenza dei materiali degli impianti sull’effetto serra (GWP fossile)

L’alluminio e l’aluzinc sono i materiali aventi il maggior impatto ambientale sia in riferimento al GER, sia rispetto al GWP.

Le plastiche sono caratterizzate da un maggior contributo al consumo energetico rispetto all’effetto serra, mentre la situazione è ribaltata per quanto riguarda gli acciai.

Oltre ad avere la conferma della minore influenza della fase di cantiere sulla generazione degli impatti, si può osservare come gli sfridi delle plastiche apportino circa il 50% del GER totale.

➤ Fase d'uso

Analizzando più in dettaglio la fase d'Uso si evince che i consumi non proporzionali alla metratura dell'edificio, quali usi obbligati, uso cucina e ACS, incidono nella misura del 41,7% sul GER di ciclo vita. Tra questi il 31% è dovuto agli usi elettrici obbligati (53 % del fabbisogno totale di risorse energetiche all'interno della sola fase d'Uso).

Il riscaldamento e la ventilazione contribuiscono per il 17% del GER di ciclo di vita (29% di GER all'interno della sola fase d'Uso).

Gli usi elettrici obbligati contribuiscono all'effetto serra con il 28,3% di GWP di ciclo vita, contro il 16% di GWP imputabile agli usi dipendenti dalla metratura, quali riscaldamento e ventilazione.

Tenuto conto che la fase di occupazione dell'edificio comporta esclusivamente consumi di tipo elettrico, è interessante analizzare nel dettaglio il peso dei consumi di tale fase per funzioni d'uso.

Nei capitoli precedenti si è già data una descrizione di tale fase, ma può essere utile ricordare che è caratterizzata da:

- consumi dipendenti dalle modalità costruttive dell'edificio e dunque riferibili alla metratura: riscaldamento e ventilazione;
- consumi imputabili principalmente alle abitudini dei fruitori e poco correlabili con la tipologia dell'edificio e quindi riferibili più in generale l'abitazione in se: usi elettrici obbligati, uso cucina e ACS.

Nota: in realtà alcuni usi elettrici obbligati dipendono, o potrebbero dipendere, almeno in parte, dalla metratura dell'edificio, ad esempio il consumo di energia elettrica per l'aspirapolvere, oppure l'illuminazione (anche se si può ipotizzare che gli abitanti dell'edificio accendano la luce solo nei locali in cui si trovano temporaneamente e non in tutta la casa...). Tuttavia, questi ragionamenti fanno parte di una eventuale ricerca più approfondita, poiché i dati statistici disponibili non consentono questo tipo di dettaglio. Sarebbe certamente utile predisporre una campagna di monitoraggio dei consumi reali in edifici esistenti.

I risultati forniti dal modello LCA permettono di fare le seguenti osservazioni:

- ✓ L'Uso "a famiglia" corrisponde a consumi energetici pari $99,8 \text{ MJ/m}^2, \text{anno}$ in termini di energia primaria (GER), di cui $74,3 \text{ MJ/m}^2, \text{anno}$ si riferiscono agli usi elettrici obbligati, $24,5 \text{ MJ/m}^2, \text{anno}$ all'uso cucina e $1 \text{ MJ/m}^2, \text{anno}$ all'ACS;
- ✓ Per quanto riguarda il GWP, gli usi dipendenti dalla metratura, quali riscaldamento e ventilazione, contribuiscono all'effetto serra con $2,4 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^2, \text{anno}$, rispetto ai $5,9 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^2, \text{anno}$ relativi agli usi obbligati.
- ✓ Gli usi elettrici obbligati incidono con il 28% di GWP di ciclo vita, corrispondente a $4,4 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^2, \text{anno}$, mentre l'uso cucina corrisponde a $1,5 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^2, \text{anno}$ e ACS corrisponde a $0,1 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^2, \text{anno}$;
- ✓ Gli usi elettrici obbligati danno un contributo al GER maggiore a quello del riscaldamento ($34,3 \text{ MJ/m}^2, \text{anno}$) e della ventilazione ($6,3 \text{ MJ/m}^2, \text{anno}$) messi insieme. Lo stesso avviene per il GWP: gli usi elettrici obbligati contribuiscono per $4,4 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^2, \text{anno}$; il riscaldamento per $2 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^2, \text{anno}$ e la ventilazione $0,4 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^2, \text{anno}$;
- ✓ L'ACS ha una ridottissima influenza sul consumo totale di risorse energetiche perché più del 95% di fabbisogno di acqua calda sanitaria viene soddisfatto grazie all'energia solare;
- ✓ Anche i consumi derivanti dall'uso della lavatrice e della lavastoviglie risultano ridimensionati grazie allo sfruttamento del solare termico per una quota pari al 50%;
- ✓ Tra gli usi elettrici obbligati la quota più energivora è la refrigerazione: 35% del GER.



Il grafico di Figura 3.2.2.7 rappresenta l'incidenza percentuale dei consumi energetici secondo la funzione d'uso. In tabella 3.2.2.5 sono invece riportati i valori assoluti degli impatti in termini di GWP, GER ed ENR.

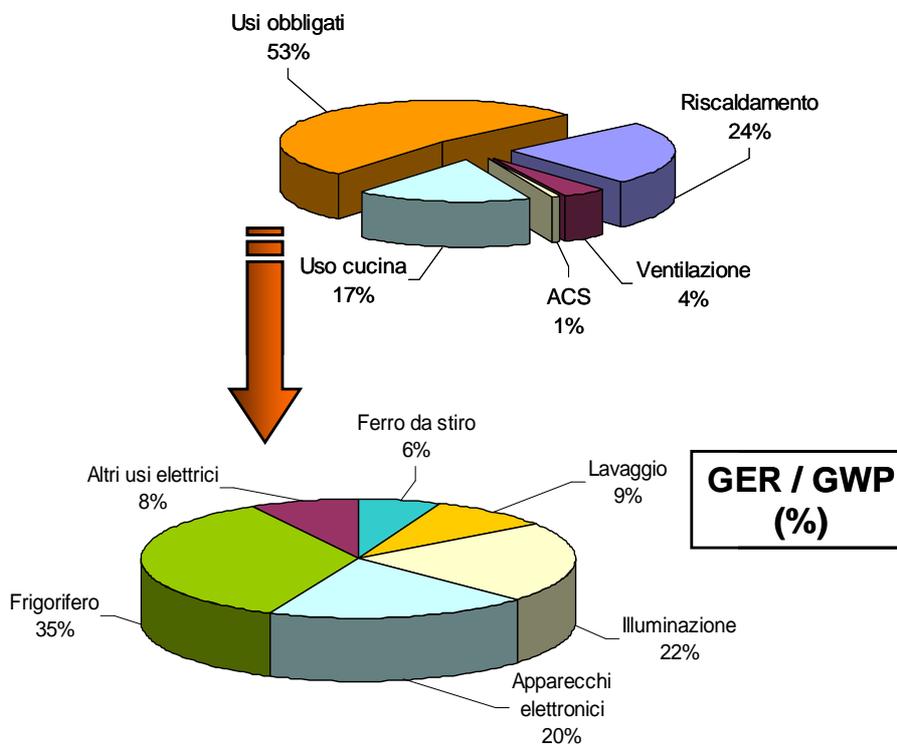


Figura 3.2.2.7- Valori percentuali di GER e GWP relativi ai consumi energetici in fase d'uso (fase d'uso = 100%)

Tabella 3.2.2.5 - Indicatori d'impatto relativi ai consumi energetici della fase d'uso (al m², all'anno)

FUNZIONI D'USO	GER (MJ)	ENR (MJ)	GWP fossile (kg CO ₂ eq)
Riscaldamento	34,3	30,6	2,04
Ventilazione	6,3	5,6	0,37
ACS	1	0,9	0,06
Uso cucina	24,5	21,8	1,45
Usi elettrici obbligati	74,3	66,3	4,41
TOTALE	140,4	125	8,34

Poiché nella fase d'Uso l'unico vettore energetico utilizzato è l'energia elettrica, i contributi relativi alle sotto fasi presentano la stessa composizione percentuale per tutti gli indicatori di categoria. Risulta evidente come gli impatti dovuti agli usi elettrici obbligati e al riscaldamento siano i più alti.



➤ **Fine Vita**

La fase di Fine-Vita rappresenta un abbassamento netto degli impatti ambientali generati durante l'intero ciclo di vita, in termini di GER e GWP.

I benefici energetico-ambientali sono misurati da valori con segno algebrico negativo degli indicatori di categoria, dovuti al recupero/riciclo che consente il risparmio di materiali ed energia, riconducibile ai cosiddetti "avoided process" (prodotti evitati). La mitigazione del consumo totale di risorse energetiche del Fine-Vita corrisponde a circa 42 MJ/m², anno evitati (-17% di GER di ciclo vita).

In termini di emissioni serra, il beneficio del fine vita è pari a -1,45 kg CO₂ eq/m², anno (-9% di GWP di ciclo vita). Le operazioni del fine vita che riducono maggiormente l'impatto energetico-ambientale sono il riciclaggio dell'alluminio (-0,52 kg CO₂ eq/m²,anno) ed il riciclaggio degli aggregati (-0,48 kg CO₂ eq/m²,anno).

La fase di Fine-Vita viene visualizzata di seguito, utilizzando la fase di Pre-Usò come termine di riferimento, per evidenziare in maniera grafica l'effettivo impatto evitato, grazie al recupero dei materiali dismessi, rispetto ai carichi ambientali legati ai materiali da costruzione ed alla costruzione della villetta.

La fase di disassemblaggio/demolizione/recupero-riciclaggio dell'edificio abbassa notevolmente gli impatti generati nella fase di costruzione dell'edificio e, conseguentemente, si ha un risparmio in termini di consumi energetici, di materie prime minerarie e di emissioni climalteranti.

La Figura 3.2.2.7 mostra i carichi energetici causati mettendo a confronto il Fine Vita con la fase di Pre-Usò, in termini di GER, GWP ed Ecoindicator 99.

Per quanto riguarda il GWP, i benefici realizzati nel fine vita sarebbero più alti se si considerano anche i crediti di CO₂ associati al quantitativo di legno riusato. Tali benefici aumenterebbero dal -16% al 27% circa.

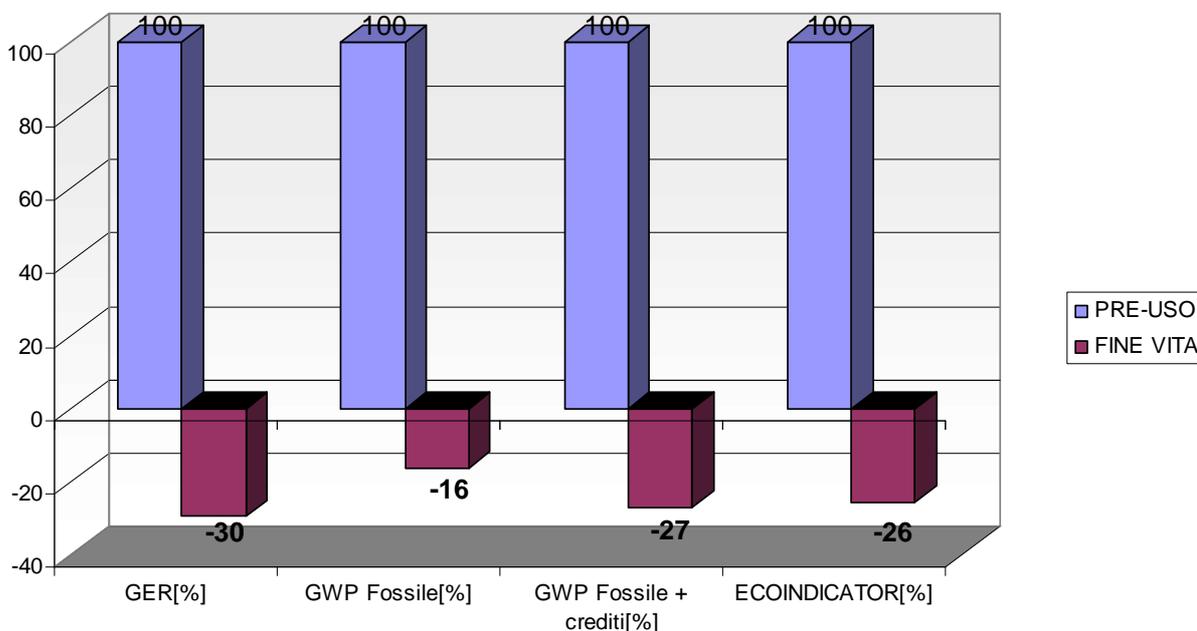


Figura 3.2.1.7 - Confronto tra Pre-Usò e Fine Vita, in termini di GER, GWP ed Ecoindicator [valori %]



I risultati dell'analisi del Fine-Vita sono stati scorporati in termini di impatti causati ed impatti evitati, relativamente al GER (Figura 3.2.2.8). La prima colonna indica gli impatti derivanti esclusivamente dai materiali dell'involucro e degli impianti, tralasciando dunque i trasporti che rappresentano circa il 4% del GER relativo alla fase di Pre-Uso.

Si è già osservato in precedenza come i benefici netti acquisiti nel Fine-Vita, relativi al GER, corrispondano a $-41,9 \text{ MJ/m}^2, \text{ anno}$.

Tali benefici rappresentano il risultato della sommatoria di impatti causati e impatti evitati: gli impatti causati sono rappresentati dal trattamento di riciclaggio (che considera tutti i carichi energetici imputabili ai diversi impianti di riciclaggio pari a $8,6 \text{ MJ/m}^2, \text{ anno}$) e da smontaggio, demolizione, trasporti e messa a discarica ($1,29 \text{ MJ/m}^2, \text{ anno}$).

Gli impatti evitati corrispondono ai prodotti sostituiti (evitati) ovvero dalle prime secondarie recuperate a fine vita pari a $-51,9 \text{ MJ/m}^2, \text{ anno}$. La stessa analisi è stata fatta per i gas serra (Fig. 3.2.2.9).

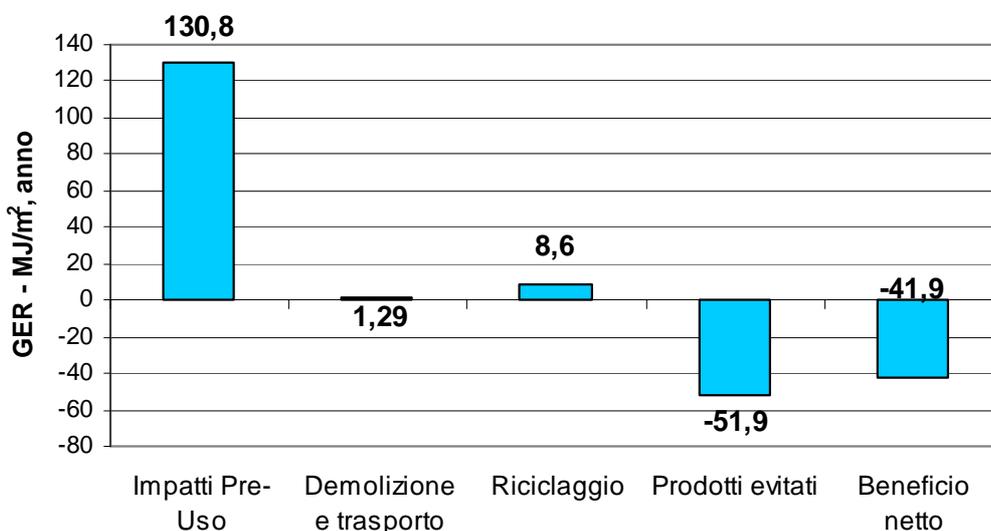


Figura 3.2.2.8 - Impatti evitati/causati nel fine vita in termini di GER

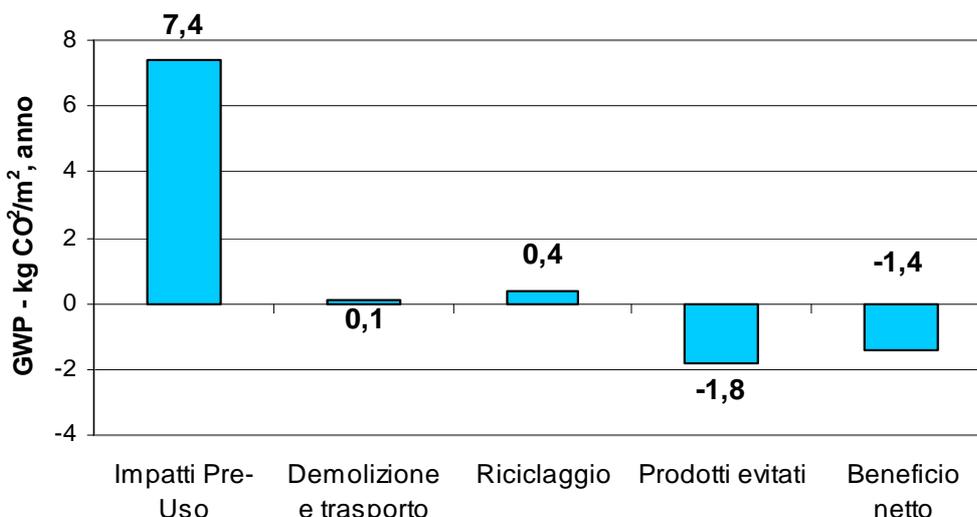


Figura 3.2.2.9 - Impatti evitati/causati nel fine vita in termini di GWP fossile

La tabella 3.2.2.6 riassume i valori, in termini di GER e GWP, relativi ai sotto-sistemi del ciclo vita analizzate: gli impatti/benefici sono imputati alle diverse tipologie di materiali considerate.

I valori di GER e GWP relativi agli impatti teorici evitati si riferiscono esclusivamente ai materiali sia dell'involucro che dell'impiantistica, senza tener conto dei trasporti.

Tabella 3.2.2.6 - Fine vita: impatti/benefici imputabili alle diverse tipologie di materiali

IMPATTI/BENEFICI CICLO VITA		MATERIALI	GER (MJ/m ² ,anno)	GWP fossile (kg CO ₂ eq/m ² ,anno)
Pre-Usò	<i>Impatti Materiali utilizzati (al netto dei trasporti)</i>	Aggregati	42,43	5,3
		Acciai	12,93	0,4
		Alluminio	13,45	0,6
		Rame	0,3	0,01
		Vetro	4,4	0,1
		Legno	49,47	0,5
		Plastiche	7,72	0,2
		Vari	0,65	0,01
		Lana di roccia	0,12	0,007
			TOTALE	130,8
Impatti causati		<i>Smontaggio</i>	0,08	0,09
		<i>Demolizione</i>	0,14	0,03
		<i>Trasporti</i>	0,67	0,04
		<i>Messa a discarica</i>	0,4	0,007
		TOTALE	1,29	0,1
Impatti causati	<i>Trattamento di riciclaggio</i>	Aggregati	0,84	0,05
		Acciai	3,92	0,16
		Alluminio	0,57	0,03
		Rame	0,25	0,01
		Vetro	3,04	0,17
		TOTALE	8,62	0,4
Impatti evitati teorici	<i>Recupero materie prime secondarie</i>	Aggregati	-6,78	-0,43
		Acciai	-9,15	-0,53
		Alluminio	-12,27	-0,55
		Rame	-0,31	-0,01
		Vetro	-3,29	-0,2
		Legno	-20,1	-0,15
	TOTALE	-51,9	-1,8	
Impatti netti evitati nel fine vita		TOTALE	-41,9	-1,4

Di seguito si evidenzia il confronto, in termini di GER, tra il Fine-Vita e la fase di Pre-Usò di alcuni materiali: gli impatti/benefici di alluminio, ferri e aggregati riciclati, sono messi in luce permettendo di valutare l'effettivo rendimento di recupero energetico del Fine Vita per ogni materiale.

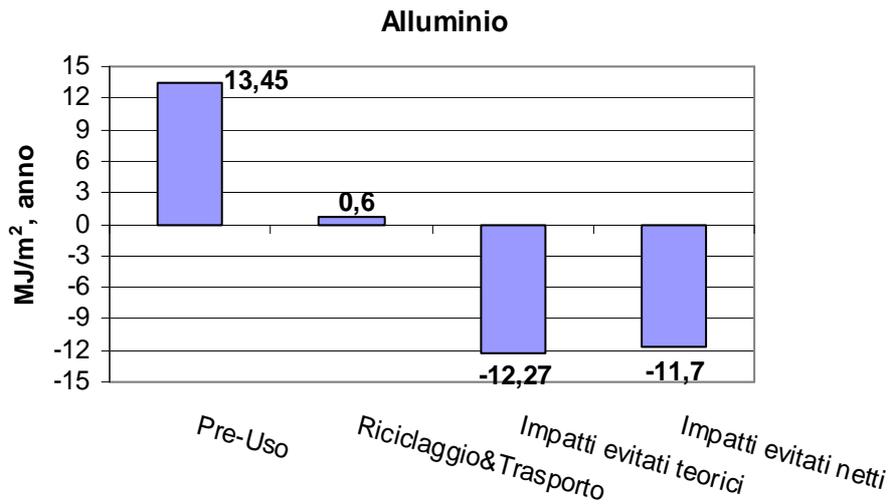


Figura 3.2.2.10 - Impatti/benefici relativi all'alluminio in termini di GER (al m²,anno)

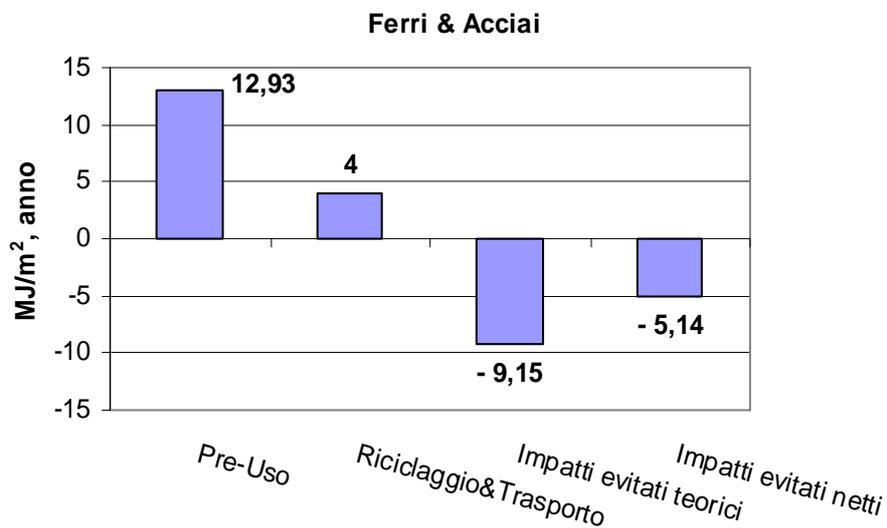


Figura 3.2.2.11 - Impatti/benefici relativi ai ferri&acciai in termini di GER (al m²,anno)

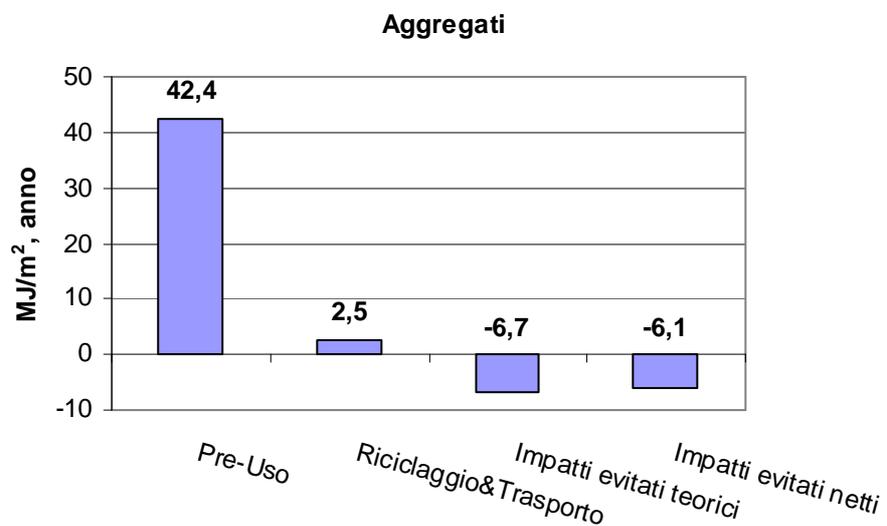


Figura 3.2.2.12 - Impatti/benefici relativi agli aggregati in termini di GER (al m²,anno)

Le percentuali di recupero delle frazioni analizzate nelle tre figure precedenti mettono in evidenza l'energia spesa in fase di produzione e l'energia recuperata nel fine vita.

Il riciclaggio dell'alluminio risulta essere l'operazione più vantaggiosa, in quanto consente di recuperare circa **87%** dell'energia spesa per la sua produzione.

La rifusione e il successivo riciclo degli acciai e dei ferri d'armatura permette di recuperare il **39,7%** dell'energia spesa in fase di Pre-Uso.

Gli aggregati in uscita dal frantoio "recuperano" solo il **14,4%** dell'energia impiegata per la produzione dei materiali da costruzione che li generano (calcestruzzo, laterizi, malte, ecc.).

3.2.3 Analisi di un diverso scenario di fine vita (100% Discarica)

Per sottolineare il beneficio energetico-ambientale derivante dal recupero/riciclo dei rifiuti C&D nel fine vita, si presentano i risultati relativi ai carichi energetici che si sarebbero ottenuti prevedendo di conferire la totalità delle macerie in discarica.

Nel diverso scenario di Fine-Vita, si prevede unicamente l'operazione di demolizione con martelloni idraulici e pinze meccaniche, con consumi pari a quelli considerati nello scenario precedente (baseline).

In seguito alla demolizione tutte le macerie vengono conferite in discarica, a circa 30 km.

Nel nuovo scenario, il Fine-Vita non rappresenta più una mitigazione degli impatti energetico-ambientali, ma incrementa i carichi energetici prodotti durante l'intero Ciclo di Vita.

I valori di GER e GWP relativi all'intera vita dell'edificio aumentano passando rispettivamente da 240 MJ/m²,anno a 292 MJ/m²,anno e da 15,6 kg CO₂ eq/m²,anno a 17,7 kg CO₂ eq/m²,anno.

I trasporti incidono in termini di GER e GWP rispettivamente con 2,7 MJ/m²,anno e 0,2 kg CO₂ eq/m²,anno.

Il conferimento in discarica contribuisce agli impatti di ciclo vita con un carico energetico del 3,4% di GER; invece i trasporti per raggiungere la discarica incidono per lo 0,9%.

Per quanto riguarda il GWP, bisogna inoltre sottolineare che, non essendo previsto alcun tipo di recupero/riciclo dei rifiuti da C&D, non si può beneficiare nel Fine Vita di alcuna riduzione della CO₂.

La tabella 3.2.3.1 sintetizza i risultati ottenuti confrontando i due diversi scenari.

Tabella 3.2.3.1: Le fasi del ciclo di vita: Confronto (GER e GWP) tra due diversi scenari di Fine vita

	GER [MJ/m ² anno]				GWP [kg CO ₂ eq/m ² anno]			
	Pre-uso	Uso	Fine Vita	Ciclo Vita	Pre-uso	Uso	Fine Vita	Ciclo Vita
Scenario riciclaggio	140	141	-42	239	8,8	8,3	-1,5	15,6
Scenario 100% discarica	140	141	11	293	8,8	8,3	0,6	17,7



3.2.4 Confronto tra modello LCA della casa di Morozzo e casa standard

Gli impatti ambientali di ciclo vita ottenuti dal modello LCA relativo alla casa di Morozzo sono stati confrontati con quelli dell'edificio con caratteristiche e consumi energetici standard (requisiti minimi di legge).

Le Figure 3.2.4.1 e 3.2.4.2 evidenziano il confronto tra la casa di Morozzo e l'edificio standard in termini di GER per quanto riguarda elementi strutturali e materiali degli impianti.

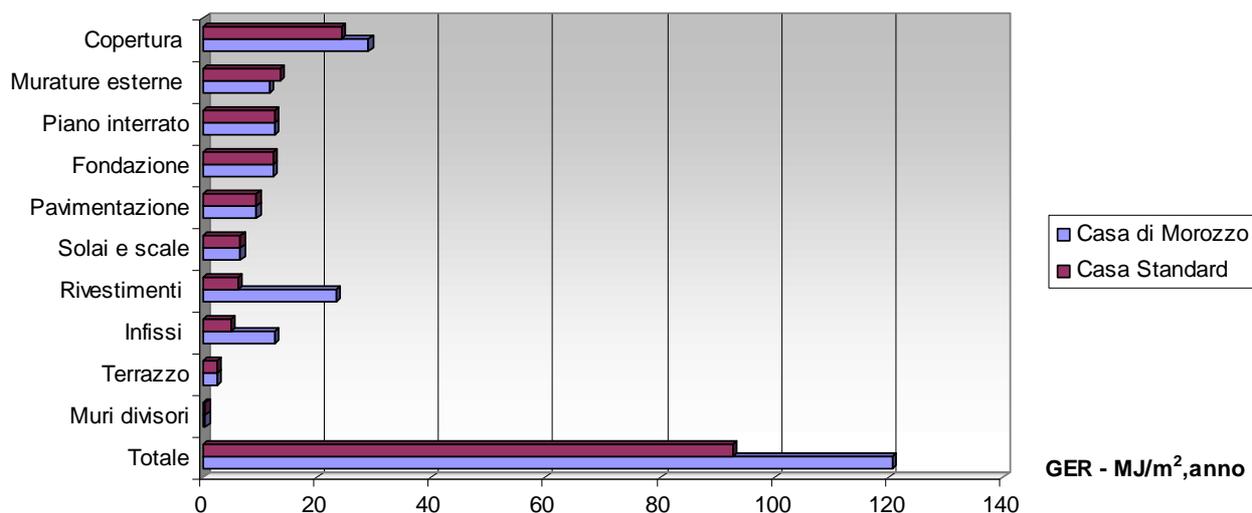


Figura 3.2.4.1 – GER confronto ELEMENTI STRUTTURALI Casa Morozzo vs. Casa Standard

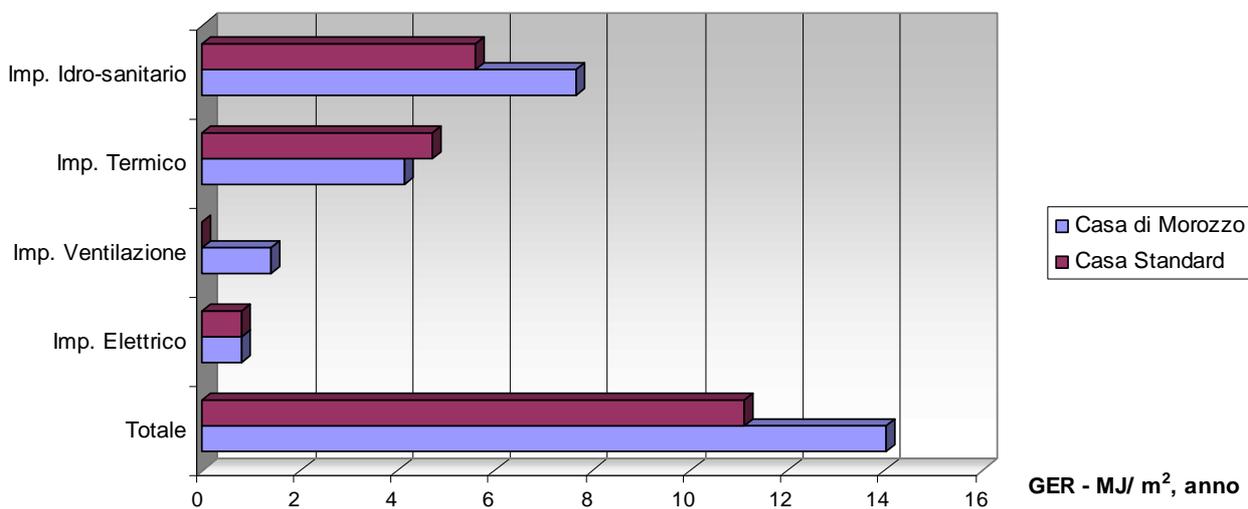


Figura 3.2.4.2 – GER confronto IMPIANTI Casa Morozzo vs. Casa Standard

Nei grafici di Figura 3.2.4.3-4-5-6-7 sono sintetizzati i risultati ottenuti dal confronto tra edificio a basso consumo energetico e edificio standard al variare dello scenario di Fine-Vita, includendo il processo di demolizione selettiva e successivo riciclaggio oppure demolizione e collocamento a discarica dei rifiuti.



Nei confronti tra scenari, oltre agli impatti totali di ciclo vita sono evidenziati i contributi della fasi principali. La fase di PRE-USO comprende la produzione, il trasporto, la messa in opera dei materiali da costruzione, fino alla realizzazione dell'edificio completo, pronto per la fase abitativa. La FASE D'USO è stata scomposta nel contributo congiunto di riscaldamento e ventilazione, separati dagli altri usi, ovvero dalla produzione di acqua calda sanitaria, usi elettrici obbligati e uso cucina. In fine la fase di FINE-VITA comprende de-costruzione, demolizione, trasporto dei materiali di risulta, processi di riciclaggio, prodotti evitati e collocazione a discarica dei residui.

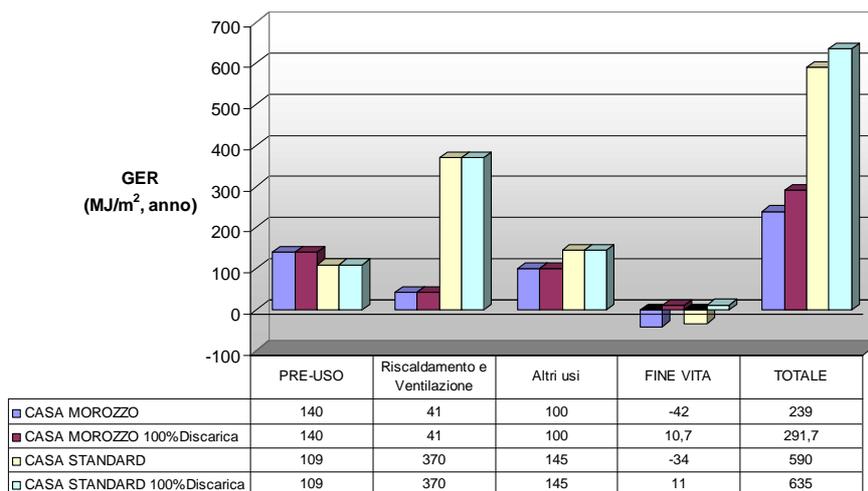


Figura 3.2.4.3 – Confronto in termini di GER tra diversi scenari di ciclo vita

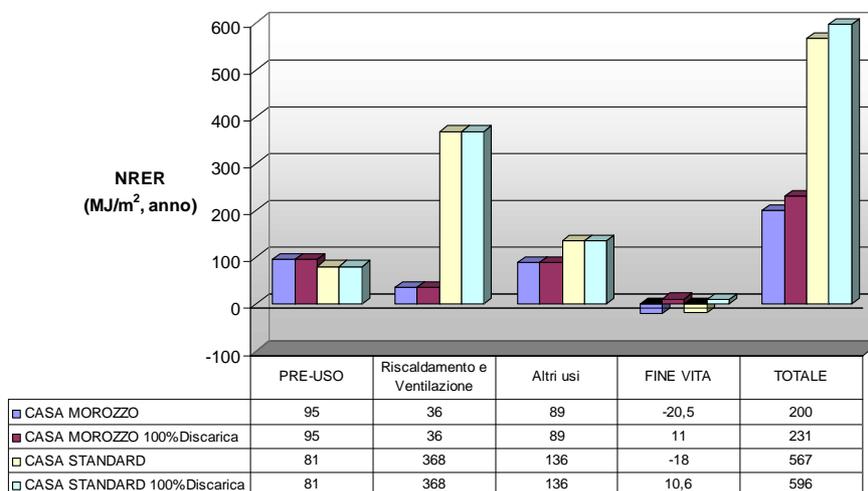


Figura 3.2.4.4 – Confronto in termini di consumo di energia non rinnovabile (ENR) tra diversi scenari di ciclo vita

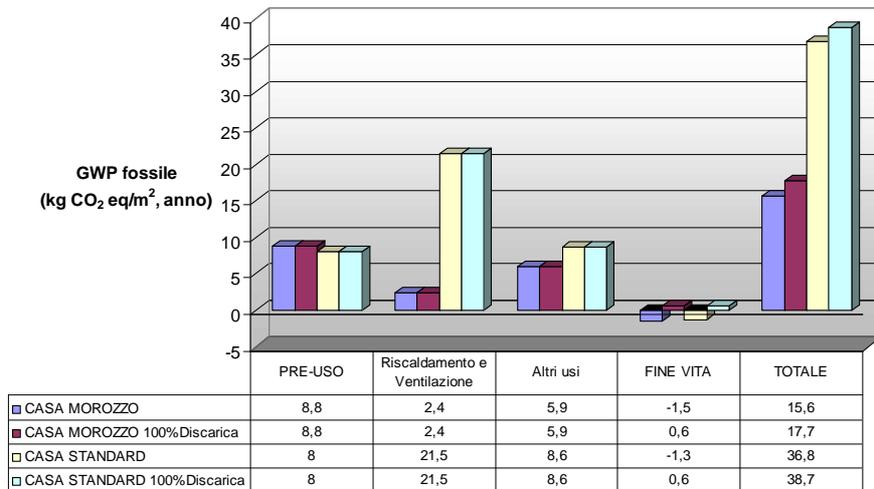


Figura 3.2.4.5 – Confronto in termini di GWP fossile tra diversi scenari di ciclo vita

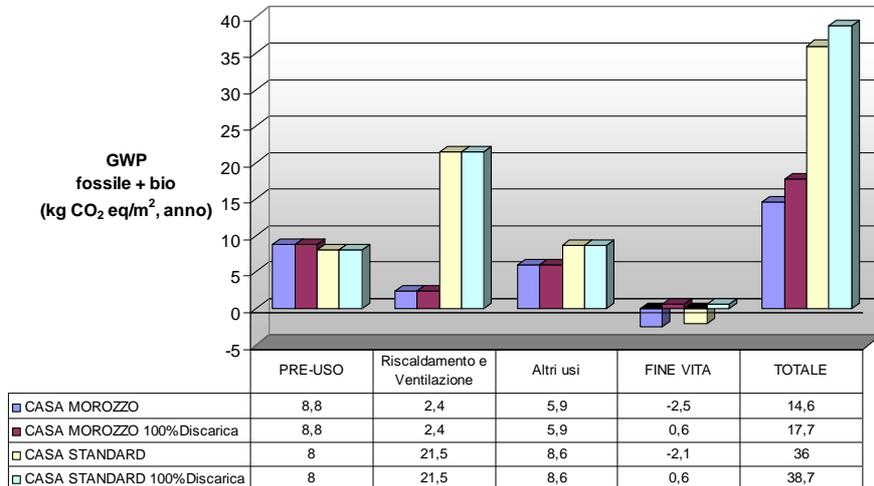


Figura 3.2.4.6 – Confronto in termini di GWP(fossile + bio “ post credits”) tra diversi scenari di ciclo vita

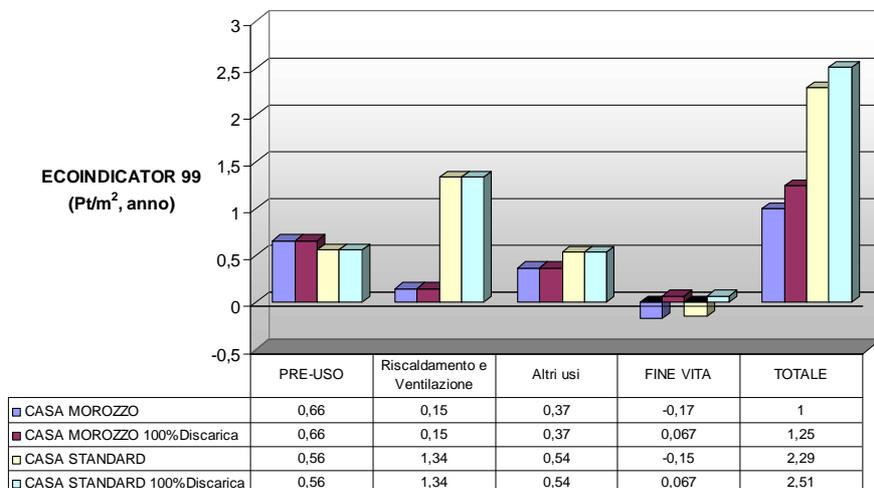


Figura 3.2.4.7 – Confronto in termini di ECOINDICATOR 99 tra diversi scenari di ciclo vita

DISCUSSIONE DEI RISULTATI E CONCLUSIONI

La ricerca, realizzata dal DITAG del Politecnico di Torino in collaborazione con lo Studio Roatta Archietti Associati e con il supporto del Settore Programmazione e Risparmio in materia energetica della Regione Piemonte, ha permesso la realizzazione di un modello informatico del ciclo di vita di una villetta a basso consumo energetico situata a Morozzo in Provincia di Cuneo attraverso l'applicazione della metodologia LCA (Life Cycle Assessment). Il modello LCA, costituito da 980 unità di processo concatenate, ricostruisce al calcolatore l'intera filiera del "prodotto edificio" con approccio *dalla-culla-alla-culla* seguendo i dettami delle normative ISO 14040-14044.

A conferma di quanto ci si aspettava, la fase di Inventario ha richiesto una considerevole mole di lavoro per reperire, organizzare e gestire la notevole quantità di informazioni necessarie a definire in modo dettagliato e comprensivo il ciclo di vita dell'edificio.

Mentre il reperimento delle informazioni sui consumi energetici per riscaldamento ed acqua calda sanitaria è stato relativamente agevole e celere, grazie ai dati ed informazioni rese disponibili dal progettista, un po' più complicato e laborioso è stato definire i restanti consumi in fase d'uso dell'edificio ed assai più arduo e lento è stato il procedimento per individuare e quantificare materiali, energia ed impatti ambientali associabili alle fasi del ciclo di vita a monte e a valle. Questo perché, storicamente, legislatore, amministratore pubblico, progettista e costruttore hanno concentrato la propria attenzione sugli elementi più energivori del ciclo di vita degli edifici, trascurando, o a volte rimandando, gli aspetti minori, anche per la mancanza di accesso diretto alle informazioni necessarie per risalire o discendere la filiera degli edifici. Di conseguenza, oggi manca, soprattutto in Italia, una "cultura" all'approccio di ciclo vita, che rende più difficoltoso che altrove il reperimento di dati affidabili e rappresentativi per la predisposizione di uno studio LCA.

Ciò premesso, l'analisi dei documenti di progetto ed il sistematico rilevamento di cantiere hanno permesso di individuare, quantificare, raggruppare ed inserire nel modello LCA la stragrande maggioranza dei materiali costituenti l'involucro e gli impianti. In questo senso, le caratteristiche di flessibilità dello strumento software SimaPro si sono rivelate preziose per arrivare a definire un modello LCA molto dettagliato che consente un'analisi sufficientemente precisa. In questa fase della ricerca, è stato dato maggior rilievo alle sfere dell'energia e dell'effetto serra, ritenute prioritarie nel settore edilizio. Tuttavia, per quanto riguarda gli altri indicatori ambientali, sebbene il modello fin qui realizzato sia già predisposto per un'analisi degli indicatori relativi all'acidificazione, all'eutrofizzazione, alla distruzione dell'ozono stratosferico ed alla creazione dello smog fotochimico, si è scelto di procedere con una valutazione aggregata e pesata dei vari effetti ambientali mediante l'impiego del metodo Ecoindicator 99, mentre si rimanda ad una eventuale seconda fase della ricerca per un'analisi di maggior dettaglio.

L'analisi di contributo, l'analisi di diversi scenari di fine-vita ed il confronto tra casa a basso consumo e casa standard hanno messo in evidenza il ruolo delle fasi del ciclo di vita e, all'interno di queste, l'importanza relativa dei sotto-sistemi che le compongono, attribuendo ad ogni materiale o singolo uso energetico il giusto peso.

Mentre nella casa standard la **fase d'uso** è responsabile per l'**81-87%** dell'uso di energia primaria (GER), per quanto riguarda la **casa a basso consumo** il contributo della fase d'uso scende al **48%** dell'energia primaria di ciclo vita, nel caso dello scenario di fine-vita senza riciclaggio dei materiali. Questo stravolge i rapporti di forza per quanto riguarda il peso delle fasi del ciclo vita, mettendo in evidenza che non è più possibile trascurare il contributo dei materiali da costruzione, sia per quanto riguarda l'energia, sia per quanto riguarda gli altri aspetti ambientali, se si vogliono perseguire delle strategie di risparmio energetico e di sostenibilità ambientale efficaci.

Ovviamente, in un contesto del genere, l'analisi LCA diventa strumento di progettazione (eco-design) e verifica dei risultati insostituibile.

Oltre a quantificare l'importanza del contributo dei materiali da costruzione, dei trasporti e delle

operazioni di cantiere, lo studio ha evidenziato i benefici che si possono ottenere con una corretta gestione del fine vita dei materiali. Infatti, mentre nell'edificio standard una corretta gestione del fine-vita attraverso opportune operazioni di demolizioni selettiva e riciclaggio portano ad un beneficio dell'8% del GER di ciclo vita, rispetto ad uno scenario 100% a discarica, nel caso dell'edificio a basso consumo il beneficio sale al 22% in termini di energia. Se si guardano gli altri indicatori, i benefici di un corretto fine-vita sono del 21% in termini di gas serra (GWP fossile + bio) e 25% in termini di Ecoindicator 99, valori certamente non trascurabili se si vuol parlare di sostenibilità ambientale degli edifici.

Se si considera il potenziale di riciclaggio netto, in termini di ciclo vita, mettendo a confronto i carichi energetico ambientali dei materiali inglobati nell'involucro e negli impianti in confronto ai benefici netti dei processi di riciclaggio, i risultati ottenibili sono certamente interessanti: 30% dell'energia, 16-27% dei gas serra (a seconda che si consideri il potenziale di sequestro di carbonio da parte del legno oppure no), 26% in termini di Ecoindicator 99.

Dall'analisi di dettaglio del modello LCA è stato possibile quantificare consumi energetici ed impatti ambientali di ciclo vita dei diversi materiali, mettendo in evidenza, per esempio, che il rendimento energetico netto di recupero e riciclo dell'alluminio è del 85% circa, quello degli acciai 40% e quello dei materiali litoidi destinati a diventare aggregati riciclati del 15% circa.

L'analisi di contributo ha inoltre evidenziato, nel confronto tra casa a basso consumo e casa standard, un dato molto interessante. La riduzione del fabbisogno energetico per riscaldamento tra casa standard e casa a basso consumo ha permesso la diminuzione da 109 a 10 kWh/m², anno. Questo equivale ad un rapporto **10 a 1** tra edificio standard e casa a basso consumo, risultato sicuramente notevole, ottenuto soprattutto grazie ai materiali utilizzati per migliorare l'isolamento e contenere i consumi energetici e grazie agli apporti solari passivi.

Poiché impianti di riscaldamento e vettori energetici utilizzati sono diversi nei due casi (caldaia a metano per la casa standard e pompa di calore ed energia elettrica per casa a basso consumo), il confronto in termini di energia primaria (diretta + indiretta = GER) porta ad un rapporto **10,7 a 1**, oppure **9,2 a 1** a seconda che si escluda o si consideri il consumo elettrico per l'impianto di ventilazione.

A questo si noti che il rendimento energetico "*di filiera*", ovvero "*dall'energia utile alla miniera*" è dell'83,7% nel caso del sistema pompa di calore + energia elettrica ($2,62 \times 0,32 = 0,837$) e dell'81,9% nel caso del sistema caldaia + metano (fonte: Ecoinvent).

Se si considera l'intera fase d'uso, aggiungendo acqua calda sanitaria, usi elettrici obbligati e uso cucina, il rapporto scende a circa **3,7 a 1**.

Se infine si confrontano gli interi cicli vita, il confronto tra casa standard e casa a basso consumo porta ad un rapporto **2,5 a 1** in termini di GER, **2,8 a 1** in termini di energia non rinnovabile, **2,5 a 1** in termini di gas serra (GWP) e **2,3 a 1** in termini di impatti ambientali aggregati (Ecoindicator 99).

Questi risultati inducono quindi a riconsiderare il ruolo di tutti gli elementi del ciclo vita che portano alla realizzazione della funzione d'uso per cui l'edificio esiste: la funzione abitativa nel suo complesso. Quel che accade, è che in un edificio a basso consumo energetico l'utilizzo di un semplice elettrodomestico, come il frigorifero o il ferro da stiro (vedi tavola grafica allegata), che fino a ieri potevano essere tranquillamente trascurati, diventa determinante, così come aumenta enormemente il contributo dei materiali da costruzione ed il relativo destino di fine-vita.

In sostanza, i benefici ambientali ottenuti con la realizzazione della casa di Morozzo sono stati dimostrati in termini di LCA, avendo provato che il maggior dispendio per produrre e mettere in opera i materiali che diminuiscono il consumo energetico è ripagato in fase d'uso, ma è consigliabile verificare ogni ulteriore obiettivo di miglioramento con l'approccio di ciclo vita per non correre il rischio di ottenere risultati inferiori alle aspettative.

E' auspicabile pertanto la prosecuzione della ricerca nel settore, se possibile supportata da misure sul campo degli effettivi consumi energetici ed estesa ad altre tipologie edilizie.



Programma di ricerca per le fasi successive

In una eventuale seconda fase della ricerca si prevede fin d'ora di eseguire un'analisi di sensitività per convalidare i risultati ottenuti.

I parametri del modello che dovranno essere considerati in tale analisi di sensitività dovranno essere concordati con il gruppo di esperti (da individuare) e con eventuali soggetti interessati.

Tra gli elementi da inserire nell'analisi di sensitività si prevedono fin d'ora i seguenti:

- dati di inventario per le operazioni di trasporto reperiti nel database Ecoinvent versione 2 (a disposizione da fine Novembre 2007);
- dati di inventario relativi al mix energetico Italia reperiti nel database Ecoinvent versione 2 (a disposizione da fine Novembre 2007);
- verifica nel modello delle effettive quantità di materiali riciclati utilizzati nell'involucro;
- sostituzione dei dati sui consumi energetici per "usi elettrici obbligati" e "uso cucina" con dati misurati;
- (...)

Bibliografia

- Adalberth, K., A. Almgren, and E.H. Petersen. 2001. Life Cycle Assessment of four multi-family buildings. *International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings* 2.
- ANPA. 2000. I-LCA Banca Dati Italiana a supporto della valutazione del ciclo di vita. Version 2.0.
- APAT. 2005. I rifiuti da costruzione e demolizione. Available on line at <http://www.apat.it>.
- Badino, V., and G. Baldo. 1998. LCA, Istruzioni per l'Uso. Esculapio Publisher, Bologna, Italy.
- Badino, V., G.A. Blengini, and C. Dinis Da Gama. 2004. The role of LCA to assess environmental performances of mineral construction materials production in Portugal and in Italy. *GEAM* 112: 51-55.
- Badino, V., G.A. Blengini, and K. Zavaglia. 2007. Measuring sustainability of building aggregates by means of LCA tools. Proc. Conf. Sustainable Development Indicators in the Mining Industry SDIMI 2007, Milos Greece, June 18-20 2007, 145-150. ISBN: 978-960-6746-00-0.
- Badino V., Blengini G.A., Mondini G., Zavaglia K. 2007. Life Cycle Assessment and sustainable constructions: eco-design issues relevant to the San Paolo Tower in Torino. Proc. Conf. Sustainable Building South Europe, Torino, Italy. 7-8 June 2007. 17-24. ISBN 13 978-88-7661-748-5.
- Blanchard, S., and P. Reppe. 1998. LCA of a residential home in Michigan. School of Natural Resources and Environment. University of Michigan, US.
- Blengini G.A., and E. Garbarino. 2006. Sustainable constructions: ecoprofiles of primary and recycled building materials. Proc. Conf. MPES2006, Torino, Italy. 20-22 September 2006, 765-770. ISBN 88-901342-4-0.
- Blengini, G.A. 2006. Life cycle assessment tools for sustainable development: case studies for the mining and construction industries in Italy and Portugal. PhD Dissertation. Instituto Superior Tecnico, Technical University of Lisbon, Lisbon, Portugal.
- Boustead I., B.R. Yaros, and S. Papisavva. 2000. Eco-labels and Eco-Indices. Do they make sense? Paper Number: 00TLCC-49. Society of Automotive Engineers Inc. Available online at <http://www.boustead-consulting.co.uk>.
- Boustead, I. 2004. Boustead model V5.0: Operating manual. Boustead Consulting Ltd., UK.
- Boustead, I., and G. F. Hancock. 1979. Handbook of Industrial Energy Analysis. EllisHorwood, Chichester/John Wiley, New York.
- Brimacombe, L., and P. Shonfield. 2001. Sustainability and Steel Recycling. International Iron and Steel Institute.



- BUWAL 250. 1998. Life cycle inventory for packagings, Volume I and II. Environmental Series No.250/I and II. Swiss Agency for the Environment, Forest and Landscape (SAEFL), Berne, Switzerland.
- ECOINVENT. 2004. Life cycle inventories of production systems. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Available online at <http://www.ecoinvent.ch>.
- ENEA. 2005. Rapporto Energia e Ambiente 2005, Rome, Italy.
- ETH-ESU 96. 1996. Ökoinventare von Energiesystemen. ESU group, ETH Technical University of Zürich.
- Georgakellos, D.A. 2006. The use of the LCA polygon framework in waste management. *Management of Environmental Quality: An International Journal* 17/4: 490-507.
- Goedkoop, M., and R. Spriensma. 1999. The Eco-indicator 99. A damage oriented method for life cycle Impact assessment. PRé Consultants, Amersfoort, The Netherlands.
- Guinée, J.B. 2002. Handbook on Life Cycle Assessment – Operational Guide to the ISO Standards. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- IDEMAT. 2001. Database, Faculty of Industrial Design Engineering of Delft University of Technology, The Netherlands.
- IPCC. 1996. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- ISO 14040. 1997. Environmental management: life cycle assessment: principles and guidelines. International Organization for Standardization, Geneva.
- ISO 14042. 2000. Environmental management. Life cycle assessment. Life cycle impact assessment. International Organization for Standardization, Geneva.
- Maddox, B., and L. Nunn. 2003. Life Cycle analysis of clay brick housing based on a typical project home. The Centre for Sustainable Technology, University of NewCastle.
- Sartori, I., and A.G. Hestnes. 2007. Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. *Energy and Buildings* 39/3: 249-257.
- Scheuer, C., G.A. Keoleian, and P. Reppe. 2003. Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modeling challenges and design implications. *Energy and Buildings* 35: 1049–1064.
- SEMC. 2000. MSR 1999:2 - Requirements for Environmental Product Declarations. Swedish Environmental Management Council, Available online at <http://www.environdec.com>.
- SETAC. 1993. Guidelines for Life-Cycle Assessment: A “Code of Practice”, Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC).
- SimaPro 6. 2004. Software and Database Manual. Pre´ Consultants BV, Amersfoort, The Netherlands.
- Thormark, C. 2000. Environmental analysis of a building with reused building materials. *International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings* 1.
- Thormark, C. 2001. Conservation of energy and natural resources by recycling building waste. *Resources, Conservation and Recycling* 33/2: 113-130.
- Thormark, C. 2002. A low energy building in a life cycle--its embodied energy, energy need for operation and recycling potential. *Building and Environment* 37/4: 429-435.



Allegato (Tavola grafica – Diagramma di flusso del Ciclo di Vita formato A1)