

LVS³

Large Valorisation on Sustainability of Steel Structures

DOCUMENTAZIONE DI BASE

Dicembre 2014

Prodotto finale di un progetto finanziato
dal Research Fund for Coal & Steel della Comunità Europea



Documentazione di base

Sebbene sia stato compiuto ogni sforzo per garantire la completezza e la qualità del presente volume nonché l'accuratezza delle informazioni ivi contenute, si declina ogni responsabilità per eventuali danni diretti o indiretti causati a cose e/o a persone derivanti dall'utilizzo della pubblicazione medesima e delle informazioni in essa contenute. La riproduzione a fini non commerciali è consentita previa citazione della fonte e comunicazione al coordinatore del progetto. La pubblica distribuzione del presente volume attraverso siti internet diversi da quelli ufficiali è subordinata all'autorizzazione dei partner del progetto.

Le richieste vanno indirizzate al coordinatore del progetto: ARCELORMITTAL BELVAL & DIFFERANGE S.A., Rue de Luxembourg 66, Esch-sur-Alzette, Luxembourg.

Il presente documento è parte integrante del progetto (RFS2-CT-2013-00016) LVS3 - Large Valorisation on Sustainability of Steel Structures, cofinanziato al fondo Research Fund for Coal and Steel (RFCS) della Comunità Europea

Questo volume rappresenta la versione italiana del testo

Helena Gervásio, Paulo Santos, Luís Simões da Silva, Olivier Vassart, Anne-Laure Hettinger and Valérie Huet (2014). *LVS3 - Large Valorisation on Sustainability of Steel Structures, Background document*

A cura di: Raffaele Landolfo, Lucrezia Cascini, Caterina Antonia Dattilo, Elvira Romano

Stampato in Italia
2014

INDICE

1	INTRODUZIONE	5
2	LA VALUTAZIONE DEL CICLO DI VITA DEGLI EDIFICI	6
2.1	<i>Il concetto di ciclo di vita</i>	6
2.2	<i>Metodologie e strumenti per la valutazione della sostenibilità in edilizia</i>	7
2.3	<i>Quadro normativo per le analisi LCA</i>	9
2.3.1	Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione	9
2.3.2	Analisi di inventario	11
2.3.3	Valutazione degli impatti ambientali	11
2.3.4	Interpretazione	20
2.3.5	Esempio	21
2.4	<i>Normative europee per la valutazione del ciclo di vita degli edifici</i>	22
2.4.1	CEN TC350	22
2.4.2	Normativa a livello di edificio (EN 15978)	23
2.4.3	Normativa a livello di prodotto (EN 15804)	28
2.5	<i>Altre normative e regolamenti (soprattutto per la fase d'uso)</i>	28
3	METODOLOGIE SEMPLIFICATE PER LA VALUTAZIONE DEGLI EDIFICI	31
3.1	<i>Introduzione</i>	31
3.2	<i>Algoritmo per la valutazione basata sul ciclo di vita per i macro-componenti</i>	31
3.2.1	Fasi generali	32
3.2.2	Allocazione dei materiali riciclati	35
3.2.3	Caratterizzazione dei macro-componenti	39
3.2.4	Esempio di assemblaggio attraverso macro-componenti	41
3.3	<i>Algoritmo per quantificare l'energia (fase d'uso)</i>	45
3.3.1	Introduzione	45
3.3.2	Ubicazione e clima dell'edificio	46
3.3.3	Metodo per il calcolo del fabbisogno energetico	50
3.3.4	Calibrazione dell'algoritmo	73
4	VALIDAZIONE DELLE METODOLOGIE ADOTTATE	81
4.1	<i>Validazione del metodo per macro-componenti</i>	81
4.1.1	Descrizione del caso studio	81
4.1.2	Scelta dei macro-componenti	83
4.1.3	Applicazione dell'approccio ai macro-componenti	85

4.1.4 Confronto con l'analisi degli impatti ambientali avanzata	86
4.2 <i>Validazione dell'approccio per il calcolo del fabbisogno energetico</i>	87
4.2.1 Dati climatici e proprietà termiche del terreno	88
4.2.2 Dati relativi alla destinazione d'uso	88
4.2.3 Impianti dell'edificio	88
4.2.4 Involucro vetrato e specifiche sull'uso dei sistemi di ombreggiamento	89
4.2.5 Involucro opaco	89
4.2.6 Risultati della performance energetica dell'edificio	89
4.2.7 Confronto con la simulazione numerica avanzata	90
4.3 <i>CONCLUSIONI</i>	92
BIBLIOGRAFIA	93
APPENDE 1 – DATABASE DEI MACRO-COMPONENTI	97

1 INTRODUZIONE

Il volume *'Documentazione di base'* rappresenta uno dei prodotti finali del progetto europeo "**Large Valorisation on Sustainability of Steel Structures, LVS³** (RFS2-CT-2013-00016)", finanziato nell'ambito del fondo Research Fund for Coal & Steel (RFCS).

Il testo affronta le principali tematiche relative alla valutazione degli impatti ambientali delle costruzioni, con particolare riferimento al caso delle strutture in acciaio. In dettaglio, nel documento si introducono due approcci metodologici complementari:

- (i) un primo approccio basato sul concetto di macro-componenti che affronta la valutazione degli impatti ambientali legati al ciclo di vita, con riferimento ai diversi pacchetti tecnologici del sistema 'edificio'
- (ii) un secondo approccio, da impiegare a scala dell'intero edificio, basato sulla quantificazione del fabbisogno energetico durante la fase d'uso.

Le metodologie in oggetto, sviluppate e validate nell'ambito di un precedente progetto europeo - il progetto RFCS *SB_Steel: Sustainability of Steel Buildings* (SB_Steel, 2014)- sono state implementate in due software di calcolo: l'applicazione *'LCA calculator'* per Android ed iPhone, sviluppato dall'Università di Coimbra (Portogallo) in collaborazione con l'ECCS ed il programma di calcolo *'AMECO'*, a cura di ArcelorMittal in collaborazione con CTICM.

Il presente volume si articola in tre sezioni principali. Nell'ambito della prima parte (Capitolo 2), a seguito di una breve introduzione sul pensiero *'life cycle thinking'*, vengono presentati i diversi metodi sviluppati nell'ambito della letteratura scientifica di settore per la valutazione della sostenibilità degli edifici nonché il quadro di riferimento generale per le analisi *'a ciclo di vita'*, in accordo alle normative internazionali ed europee vigenti.

La seconda parte del volume (Capitolo 3) analizza in dettaglio i due approcci metodologici semplificati, introdotti in precedenza, per la valutazione degli impatti ambientali e per la quantificazione del fabbisogno energetico relativo alla fase d'uso degli edifici.

Nell'ultima parte del volume (Capitolo 4), infine, si esamina un caso studio a validazione delle metodologie proposte.

2 LA VALUTAZIONE DEL CICLO DI VITA DEGLI EDIFICI

2.1 Il concetto di ciclo di vita

L'analisi basata sul *ciclo di vita* (*Life Cycle Assessment*, LCA) è una procedura oggettiva che permette di valutare i carichi ambientali associati ad un prodotto, ad un processo o ad un'attività e che consente di determinare ed orientare le scelte progettuali, in modo da perseguire lo scopo generale di migliorare la qualità dell'ambiente.

Valutare gli impatti ambientali attraverso un'analisi LCA significa identificare e quantificare diverse risorse quali i materiali utilizzati, il fabbisogno energetico, i rifiuti solidi e le emissioni in atmosfera e in acqua, considerando tutte le fasi del ciclo di vita di un prodotto, dall'acquisizione delle materie prime fino alla fine della sua vita (Fig. 2.1). Negli ultimi anni, studi di ricerca condotti in tale ambito hanno dimostrato l'importanza di considerare l'intero ciclo di vita di un prodotto e l'utilizzo di questo tipo di analisi è ormai riconosciuto a livello internazionale, nonchè raccomandato da varie politiche europee tra cui la Politica Integrata di Prodotto (COM (2003)302).

Il principale vantaggio del "*pensare secondo il ciclo di vita*" (*Life Cycle Thinking*) è quello di impedire che i carichi ambientali possano spostarsi da una fase ad un'altra del ciclo di vita, oppure da una zona geografica all'altra o ancora da una matrice ambientale (ad esempio la qualità dell'aria) ad un'altra (per esempio l'acqua o terreno) (UNEP, 2004).

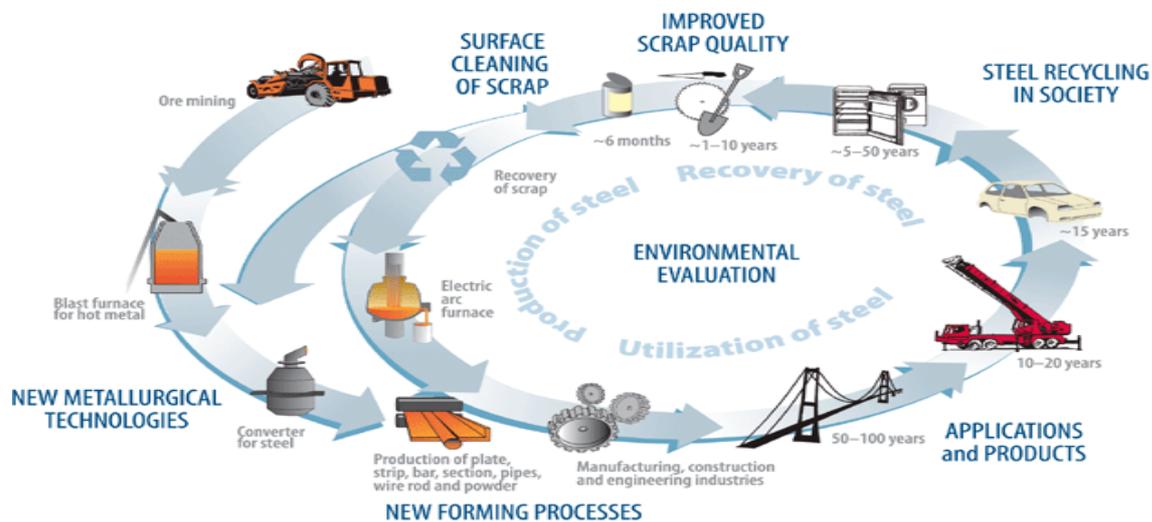


Fig. 2.1 Il ciclo di vita dell'acciaio (riferimento stalkretsloppet.se)

L'utilizzo di metodologie LCA consente, inoltre, di effettuare scelte più oculate se si considerano le ricadute nel lungo termine. Ogni fase del ciclo di vita di un prodotto (*dalla culla alla tomba*) è responsabile di determinati impatti che ricadono sull'ambiente (UNEP, 2004), ed attraverso un'analisi dettagliata del ciclo di vita, quantificando le emissioni nocive che vengono immesse in aria, acqua e terra, è possibile individuare i processi più

critici e su di essi intervenire al fine di ottenere migliorare la prestazione ambientale in termini di impatto.

Tuttavia, effettuare questo tipo di analisi presenta alcuni svantaggi:

- ✓ L'analisi LCA è onerosa, in termini di tempo e costi, e spesso richiede l'intervento di esperti nel settore.
- ✓ Le ipotesi alla base di un'analisi LCA possono essere, talvolta, soggettive (ad esempio nella definizione dei confini del sistema, nella scelta dei database e dei criteri di valutazione di impatto).
- ✓ I risultati di uno studio LCA sono spesso legati a dati specifici di una determinata area geografica e, pertanto, non possono essere utilizzati in termini generali.
- ✓ L'accuratezza di uno studio LCA dipende dalla qualità e dalla disponibilità dei dati.

I metodi basati sul ciclo di vita, proposti e descritti in questo volume, cercano di superare alcune delle problematiche appena evidenziate.

Nel prossimo paragrafo, verrà esposta una breve sintesi sulle diverse metodologie e sugli strumenti utilizzati per la valutazione della sostenibilità ambientale nel settore delle costruzioni.

2.2 Metodologie e strumenti per la valutazione della sostenibilità in edilizia

Tra i diversi settori industriali, quello legato alle costruzioni risulta essere uno dei maggiori responsabili degli impatti nocivi prodotti sull'ambiente. Negli ultimi decenni, la necessità di ridurre al minimo gli impatti negativi prodotti dalle costruzioni, ha fatto crescere sempre di più l'interesse nei confronti delle analisi finalizzate alla valutazione ambientale degli edifici.

Attualmente, la valutazione della sostenibilità ambientale in edilizia avviene attraverso due grandi classi di strumenti (Reijnders e Roedel, 1999):

- (i) Strumenti qualitativi basati su punteggi e criteri;
- (ii) Strumenti quantitativi basati sull'analisi degli impatti ambientali in termini di input ed output nel ciclo di vita.

Al primo gruppo di strumenti appartengono sistemi di valutazione quali il LEED (negli Stati Uniti), il BREAM (nel Regno Unito), il GBTool (International Initiative for a Sustainable Built Environment (iiSBE)), ecc., noti anche come *sistemi di rating*, basati sulla assegnazione di *punteggi* e *crediti* ad un set di parametri predefiniti. Questi ultimi, sebbene principalmente qualitativi, possono essere anche di tipo quantitativo e persino derivare da analisi LCA di dettaglio, come nel caso dei *crediti* attribuiti ai materiali.

Questi sistemi sono, in genere, impiegati per ottenere le certificazioni di bioedilizia e le eco-etichette e non saranno oggetto di approfondimento nel presente documento, che analizzerà con maggior dettaglio il secondo gruppo di strumenti, basati sulle analisi del ciclo di vita.

Sebbene l'analisi LCA sia stata concepita in modo da poter essere condotta per qualsiasi tipo di prodotto e/o processo, essa presenta alcune problematiche che non ne

consentono l'applicazione rigorosa al caso degli edifici e, più in generale, al settore delle costruzioni. Ciò è dovuto principalmente alle seguenti cause (IEA, 2001):

- (i) Elevato grado di incertezze dovuto ad una vita utile degli edifici lunga e non sempre nota a priori.
- (ii) Notevole influenza e dipendenza dal luogo di costruzione: gli edifici non sono elementi standard ma risentono fortemente delle tradizioni costruttive locali così come gli impatti prodotti sono essenzialmente impatti di tipo locale;
- (iii) Prodotti da costruzione, spesso, realizzati con materiali compositi; ciò comporta la necessità di raccogliere molteplici informazioni specifiche sui processi di produzione dei singoli materiali.
- (iv) Consumi di energia nella fase d'uso fortemente dipendenti dal comportamento degli occupanti e dal funzionamento degli impianti;
- (v) Multi-funzione: un edificio accoglie generalmente più funzioni e ciò può rendere complessa l'identificazione di una appropriata unità funzionale;
- (vi) L'appartenenza ad un sistema complesso: gli edifici sono strettamente integrati alle infrastrutture urbane come strade, condutture, spazi verdi, e impianti di trattamento; pertanto, condurre un'analisi LCA su un singolo edificio, senza tenere conto di tutti questi elementi può fornire risultati non corretti.

La valutazione del ciclo di vita degli edifici e dei suoi componenti può essere effettuata attraverso due categorie distinte di strumenti di analisi LCA: la prima comprende gli strumenti sviluppati con l'obiettivo di valutare le prestazioni di materiali e componenti da (ad esempio, BEES (Lippiatt, 2002); alla seconda appartengono gli strumenti il cui fine è analizzare l'edificio nel suo complesso (ad es Athena (Trusty, 1997), Envest (Howard et al. 1999), EcoQuantum (Kortman et al., 1998)). Questi ultimi sono, in genere, più complessi poiché la prestazione globale dell'edificio dipende sia dalle interazioni tra i singoli componenti e sottosistemi, che dalle interazioni tra gli occupanti e con l'ambiente esterno. La scelta dello strumento più appropriato dipende dagli obiettivi specifici che l'analisi vuole perseguire.

A tal fine, utili riferimenti si possono ritrovare nei rapporti finali del progetto Europeo *Practical Recommendations For Sustainable Construction*, PRESCO (Kellenberger, 2005) in cui si è stata valutata la precisione e l'opportunità di utilizzare diversi strumenti di analisi LCA a supporto della progettazione e sono stati effettuati numerosi confronti mirati tra i diversi tool esistenti attraverso l'applicazione degli stessi a casi studio. Per ulteriori informazioni sulla comparazione degli strumenti di valutazione ambientale esistenti si rimanda agli studi di Jönsson (2000) e Forsberg & von Malmborg (2004).

Come già accennato, un obiettivo specifico del presente volume è quello di approfondire il tema della analisi LCA applicate alle strutture in acciaio. Nei paragrafi successivi, verrà quindi introdotto il quadro normativo relativo all'analisi LCA: in primo luogo, verranno presentate le norme internazionali ISO 14040 (2006) e ISO 14044 (2006), che forniscono il quadro generale per l'analisi LCA; successivamente saranno descritte le nuove norme europee per la sostenibilità delle costruzioni mirate a creare una legislazione specifica

per il settore. E' opportuno sottolineare che mentre il primo gruppo di norme ha un carattere più generale, le seconde fanno riferimento specifico al caso delle costruzioni.

2.3 Quadro normativo per le analisi LCA

Le normative internazionali ISO 14040 (2006) e 14044 (2006) definiscono il quadro generale, i principi ed i requisiti per effettuare e riportare i risultati degli studi sulla valutazione degli impatti ambientali. Nel rispetto di queste normative, l'analisi LCA comprende quattro fasi consecutive fondamentali: (1) la *definizione degli obiettivi e del campo di applicazione*, (2) *l'inventario*, (3) *la valutazione dell'impatto*, (4) *l'interpretazione dei risultati*. Come rappresentato in Figura 2.2, le varie fasi sono correlate tra loro e talvolta è necessaria una procedura iterativa per raggiungere l'obiettivo dello studio. Le diverse fasi saranno descritte in dettaglio nei successivi paragrafi.

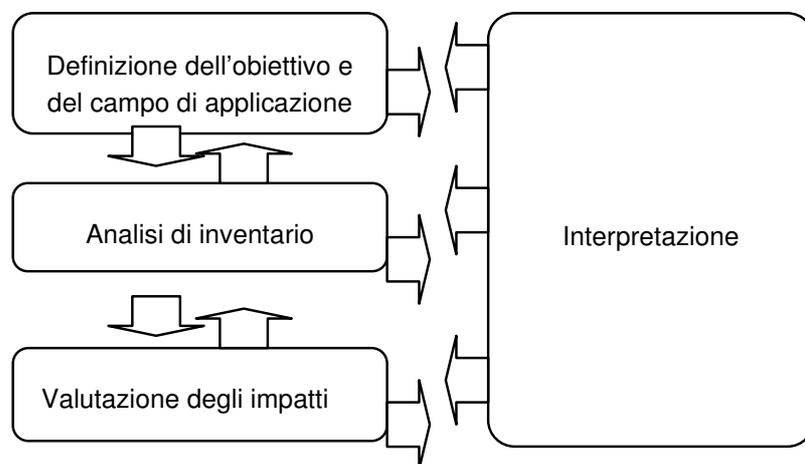


Fig. 2.2: Schema delle principali fasi dell' LCA (ISO 14044:2006)

2.3.1 Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione

Nel definire l'*obiettivo* di un'analisi LCA bisogna individuare in modo preciso l'applicazione oggetto dell'analisi, le motivazioni per cui si effettua lo studio nonché il tipo di pubblico a cui è rivolto tale studio, al fine di garantire una comunicazione quanto più trasparente possibile.

Con riferimento al *campo di applicazione*, bisogna principalmente definire le funzioni del sistema di prodotti analizzati, l'*unità funzionale* a cui fare riferimento ed il *confine del sistema*.

2.3.1.1 Funzione e unità funzionale

Come detto in precedenza, nel definire il campo di applicazione è necessario individuare in maniera univoca quali sono le *funzioni* del sistema oggetto di studio. L'*unità funzionale* è un riferimento per la misura dei flussi in ingresso ed uscita del sistema/prodotto; nello

specifico, l'unità funzionale ha lo scopo di fornire un riferimento rispetto al quale normalizzare i dati (in termini di materia ed energia) in entrata e in uscita. Tale riferimento è necessario per garantire la comparabilità dei risultati di uno studio LCA che si presenta particolarmente critica quando si effettuano confronti tra sistemi differenti, rispetto ai quali è necessario assicurare che gli stessi siano effettuati su base comune.

2.3.1.2 Confini del sistema

Il *confine del sistema* determina i processi unitari che devono essere inclusi in un'analisi LCA. Per un generico materiale, un'analisi LCA può comprendere tutte le fasi del ciclo di vita, dalla produzione delle materie prime fino alla fase di fine vita (Fig. 2.3).



Fig. 2.3: Processi inclusi in un'analisi LCA per un generico materiale

Un'analisi LCA, può essere definita in modo specifico a seconda delle fasi del ciclo di vita considerate: se il calcolo include solo le fasi iniziali della produzione del materiale l'analisi è definita "*dalla culla al cancello*"; se, invece, si tiene conto dell'intero ciclo di vita (dalla produzione delle materie prime fino al fine vita) si procede ad una cosiddetta analisi "*dalla culla alla tomba*". Infine quando si considerano i processi di riciclo al fine vita e grazie alla produzione di tali materiali '*di seconda mano*' si evita la produzione di nuovi materiali, lo studio LCA è spesso noto come analisi "*dalla culla alla culla*".

Diversi sono i fattori che influiscono sulla definizione dei confini del sistema, quali, ad esempio, il campo di applicazione dello studio, le ipotesi formulate, i criteri di cut-off, i vincoli del progetto in termini di dati disponibili e costi ed infine il pubblico previsto.

In linea di principio, il sistema dovrebbe essere modellato in modo che gli elementi in ingresso ed in uscita ai suoi confini, il livello di aggregazione nell'ambito di una categoria di dati, etc.. siano flussi elementari di processi e di prodotti.

2.3.1.3 Requisiti di qualità dei dati

Al fine di soddisfare l'obiettivo e lo scopo dell'analisi LCA, la norma ISO 14044 indica i seguenti requisiti:

- Copertura temporale: i dati devono essere raccolti in un periodo di tempo relativamente prossimo a quello dell'analisi;
- Copertura geografica: luogo da cui dovrebbero essere ricavati i dati;
- Copertura tecnologica: dati relativi ai materiali e alle specifiche tecniche di un prodotto;
- Precisione: misura del grado di variabilità dei dati (per esempio la varianza);
- Completezza: percentuale dei flussi misurati o stimati;
- Rappresentatività: valutazione qualitativa del grado in cui i dati sono rappresentativi;

- Coerenza: valutazione qualitativa della metodologia di studio;
- Riproducibilità: valutazione qualitativa della riproducibilità dei risultati riportati nello da parte di esecutore indipendente riprodurre ;
- Fonte dei dati;
- Incertezza delle informazioni (per esempio sui dati, sui modelli, sulle ipotesi).

2.3.2 Analisi di inventario

La seconda fase di uno studio LCA è l'*analisi dell'inventario (Life Cycle Inventory, LCI)* che comprende la raccolta dei dati e la definizione delle procedure di calcolo per quantificare i flussi in entrata e in uscita di un sistema, relativi all'impiego delle risorse e alle emissioni in aria, acqua e terra.

I dati qualitativi e quantitativi da includere nell'inventario dovranno essere raccolti per ciascun processo unitario compreso nei confini del sistema.

La raccolta dei dati può essere estremamente laboriosa ed onerosa, pertanto le necessarie semplificazioni adottate nell'ambito dello studio vanno chiaramente dichiarate nel campo di applicazione e documentate nella relazione finale.

2.3.3 Valutazione degli impatti ambientali

2.3.3.1 Metodo generale di calcolo

La terza fase dell'analisi LCA, nota come *valutazione dell'impatto del ciclo di vita (Life Cycle Impact Assessment, LCIA)*, ha lo scopo di determinare i potenziali impatti ambientali, facendo riferimento ai risultati dell'analisi di inventario. In generale, questo processo implica l'associazione dei dati dell'inventario a specifici impatti ambientali e si esplica in due fasi:

- (i) Fasi obbligatorie: *classificazione e caratterizzazione*;
- (ii) Fasi opzionali: *normalizzazione, raggruppamento e pesatura*.

La *classificazione* comporta, in primo luogo, la selezione di opportune categorie di impatto in funzione dell'obiettivo dello studio e la successiva assegnazione dei risultati dell'LCI per ciascuna categoria impatto individuata. Si utilizzano opportuni fattori di caratterizzazione per descrivere il contributo relativo dei risultati dell'LCI assegnati alla categoria di impatto attraverso opportuni indicatori di categoria. Secondo questo metodo le categorie di impatto sono funzioni lineari: i fattori di caratterizzazione sono indipendenti dalla rilevanza ambientale, come indicato dall'espressione 2.1:

$$impact_{cat} = \sum_i m_i \times charact_factor_{cat,i}$$

Eq. (2.1)

dove m_i è la massa del flusso presente nell'inventario i e $charact_factor_{cat,i}$ è il fattore di caratterizzazione del flusso dell'inventario i della categoria di impatto.

In riferimento alle fasi opzionali dell'analisi LCA, la *normalizzazione* è generalmente necessaria per comprendere in che misura una categoria d'impatto contribuisce all'impatto ambientale complessivo. Nella fase di *ponderazione* dei risultati agli indicatori normalizzati, per ciascuna categoria di impatto, vengono assegnati fattori numerici in base alla loro importanza relativa.

La *ponderazione* si basa su valori soggettivi piuttosto che scientifici; pertanto la normativa ISO 14044 evidenzia una distinzione tra applicazioni interne ed esterne. Tuttavia se fosse necessario confrontare e presentare in pubblico i risultati ottenuti, non è particolarmente opportuno fare ricorso alla fase di ponderazione.

Il *raggruppamento* è un'altra fase opzionale della valutazione del ciclo di vita in cui le categorie sono aggregate in uno o più gruppi. In questo caso, in accordo alla norma ISO 14044, si possono impiegare due differenti procedure: classificazione degli indicatori di categoria su base nominale o su scala ordinale.

Il presente documento si analizza soltanto le fasi obbligatorie dell'analisi LCA.

2.3.3.2 *Calcolo dei potenziali impatti ambientali*

Come già ampiamente evidenziato, lo scopo di un'analisi LCA è quello di valutare i potenziali impatti ambientali associati ai flussi in ingresso e in uscita di un determinato sistema/prodotto. Nel paragrafo successivo, saranno brevemente descritte le categorie di impatto ambientale più comuni, insieme ai relativi metodi di calcolo adottati nell'approccio semplificato descritto in questo volume.

2.3.3.3 *Potenziale di Riscaldamento Globale (Global Warming Potential, GWP)*

L'*effetto serra* (Fig. 2.4) è provocato dai raggi infrarossi (IR), presenti in maniera naturale nell'atmosfera terrestre (ad esempio H₂O, CO₂ e O₃), che assorbono l'energia (infrarosso o radiazione) e riflettono parte di questo calore sulla Terra, contribuendo al riscaldamento della superficie e della bassa atmosfera.

La concentrazione di questi gas, noti anche come Gas Serra (Green House Gases, GHG), si è accentuata a partire dal periodo industriale, contribuendo alla crescita smisurata dell'effetto serra naturale della Terra. In questo modo si è verificato un aumento della temperatura della superficie terrestre e uno stato di allarme in relazione ai potenziali cambiamenti climatici che ne conseguono.

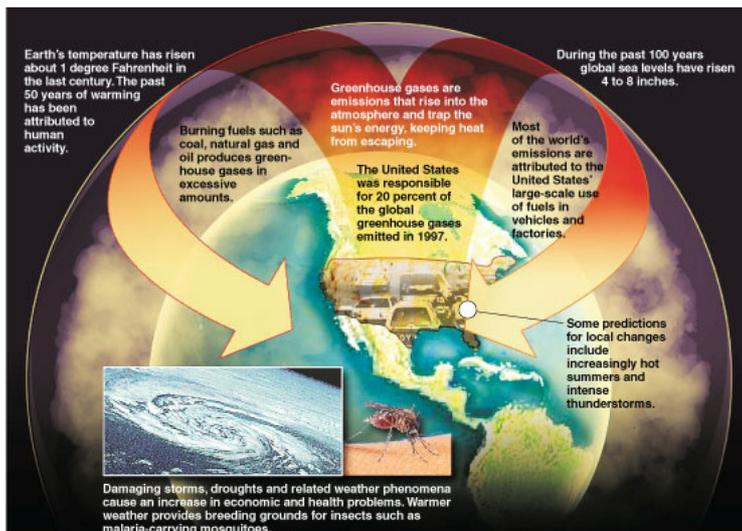


Fig. 2.4: Riscaldamento globale (EPS, 2009)

Non tutti i gas serra sono uguali. Nonostante l'anidride carbonica CO_2 sia il gas serra più diffuso, esiste una serie di altri gas che contribuiscono in egual misura ai cambiamenti climatici. L'indicatore dell'effetto serra è il Potenziale Riscaldamento Globale (*Global Warming Potential, GWP*).

Il GWP misura quanto una molecola di un determinato gas serra contribuisce al riscaldamento globale; l'indice si basa su una scala relativa che permette di confrontare ogni gas con il biossido di carbonio (CO_2), il cui GWP si assume per definizione pari al valore 1. Il valore dell'indicatore GWP è valido entro un certo intervallo di tempo, perciò è possibile che subisca cambiamenti nel medio periodo.

In particolare, il Gruppo Intergovernativo che si occupa di Cambiamenti Climatici (*Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, 2007*) ha calcolato i valori di GWP per tre orizzonti temporali, ovvero 20, 100 e 500 anni (Tabella 2.1).

Tabella 2.1 – GWP per tre orizzonti temporali (in $\text{kg CO}_2 \text{ eq./kg}$) (IPCC, 2007)

	20 anni	100 anni	500 anni
Diossido di Carbonio (CO_2)	1	1	1
Metano (CH_4)	62	25	7
Ossido di Azoto (N_2O)	275	298	156

Dunque, in conformità all'espressione (2.2), la determinazione dell'indicatore "Riscaldamento Globale (*Global Warming*)" è dato da:

$$\text{Global Warming} = \sum_i \text{GWP}_i \times m_i$$

Eq. (2.2)

dove, m_i è la massa della relativa sostanza i (in kg). Questo indicatore è espresso in *kg of CO_2 equivalente*.

Nello studio riportato in questo documento, è stato considerato il solo orizzonte temporale di 100 anni.

2.3.3.3.1 Potenziale di Eliminazione dell'Ozono (Ozone Depleting Potential, ODP)

I gas che provocano la diminuzione dell'ozono causano danni all'ozono stratosferico (O₃) o allo "strato di ozono", attraverso il rilascio di radicali liberi (Fig. 2.6).

Il danneggiamento dello strato di ozono riduce la sua capacità di schermare i raggi ultravioletti (UV) che attraversano l'atmosfera terrestre, aumentando, di conseguenza la quantità dei raggi cancerogeni UVB che raggiungono la superficie terrestre.

Questo processo, a sua volta, si traduce in problemi di salute per gli esseri umani, come il cancro della pelle o le cataratte e in danni causati dal sole che si ripercuotono su animali e colture. I principali gas dannosi per l'ozono sono CFC, HCFC e halon.

Negli anni '80 una crescente attenzione a tale problema ha portato alla nascita di politiche di sensibilizzazione a livello mondiale, culminate con il protocollo di Montreal che ha stabilito il divieto di rilascio di molti dei gas più dannosi per l'ozono.

Il potenziale di eliminazione dello strato di ozono (*Ozone Depleting Potential, ODP*) è definito come la perdita globale di ozono provocata da una sostanza rapportata alla perdita globale di ozono dovuta alla sostanza di riferimento CFC-11.

Ciò conferisce all'ODP un'unità di riferimento espressa in kg di clorofluorocarburi-11 equivalente (CFC-11). Il modello di caratterizzazione è stato sviluppato dalla Organizzazione Mondiale di Meteorologia (*World Meteorological Organization, WMO*) e definisce il potenziale di riduzione dell'ozono di gas diversi.

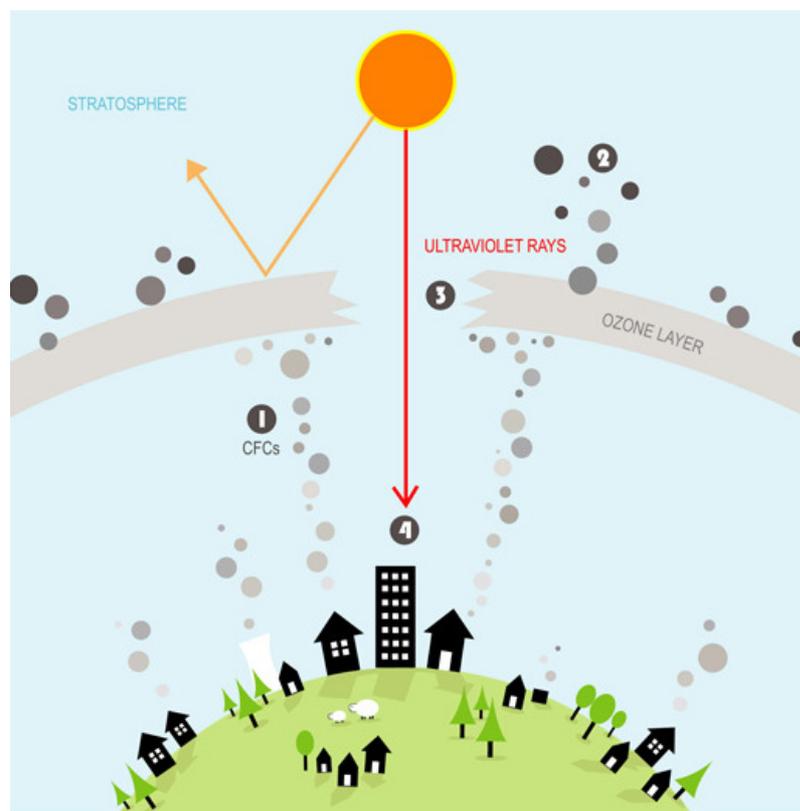


Fig. 2.5: Ozone depletion (BlendSpace, 2013)

Pertanto, considerato uno stato stazionario, i valori degli ODP di alcune sostanze sono riportati nella Tabella 2.2 (Heijungs et al., 1999).

Tabella 2.2 – ODP per alcune sostanze (in kg di CFC-11 eq./kg) (Heijungs et al., 1999)

	Stato stazionario ($t \approx \infty$)
CFC-11	1
CFC-10	1.2
Halon 1211	6.0
Halon 1301	12.0

L'indicatore del potenziale di eliminazione dell'ozono è, dunque, dato dalla relazione:

$$\text{Ozone Depletion} = \sum_i \text{ODP}_i \times m_i$$

Eq. (2.3)

dove, m_i è la massa della relativa sostanza i (in kg). Tale indicatore è espresso in *kg di CFC-11 equivalente*.

2.3.3.3.2 Potenziale di Acidificazione (Acidification Potential, AP)

L'acidificazione rappresenta il processo attraverso il quale le principali sostanze acide, ovvero ammoniaca NH_3 , anidride solforosa SO_2 e ossidi di azoto NO_x generano l'inquinamento atmosferico (Fig. 2.6). I componenti acidificanti emessi in atmosfera vengono trasportati dal vento e depositati come particelle acide sotto forma di pioggia o neve. A causa delle precipitazioni, l'ecosistema subisce danni a diversi livelli, a seconda della natura degli ecosistemi del paesaggio, anche a distanze considerevoli dalla fonte dei gas.

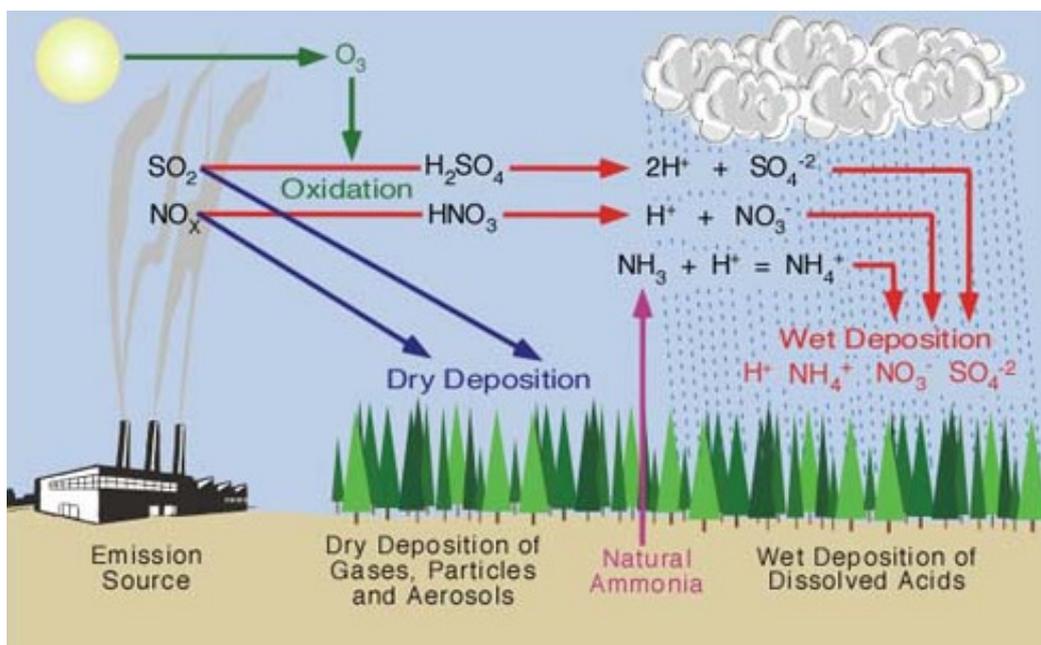


Fig. 2.6: Potenziale di acidificazione (The energy library, 2013)

Il potenziale di acidificazione si determina considerando la capacità di una sostanza a rilasciare in aria ioni H⁺, causa di acidificazione, oppure può essere determinato per un rilascio equivalente di SO₂.

I fattori di caratterizzazione adottati in questo documento sono basati sul modello RAINS-LCA, da cui sono ripresi gli obiettivi e gli effetti (Huijbregts, 2001). I fattori medi di caratterizzazione europei per l'acidificazione sono riportati in Tabella 2.3

Tabella 2.3 – Potenziale di acidificazione (in kg di SO₂ eq.) (Huijbregts, 2001)

	Ammoniaca (NH₃)	Ossidi di azoto (NO_x)	Anidride solforosa (SO₂)
AP _i	1.60	0.50	1.20

L'indicatore di acidificazione è dato dalla seguente equazione:

$$Acidification = \sum_i AP_i \times m_i$$

Eq. (2.4)

dove, m_i è la massa della relativa massa i (in kg). Questo indicatore è espresso in in *kg di SO₂ equivalente*.

2.3.3.3.3 Potenziale di Eutrofizzazione (Eutrophication Potential, EP)

Sostanze nutritive, come nitrati e fosfati, vengono di solito aggiunti al suolo attraverso fertilizzanti per stimolare la crescita delle piante e dei prodotti agricoli. Tali nutrienti sono essenziali per la vita; tuttavia possono raggiungere accidentalmente habitat naturali sensibili (acqua o terra), provocando una potenziale sovrapproduzione di piante o alghe che, a loro volta, possono soffocare gli organismi già presenti in queste zone. Alla luce di questa considerazione, l'eutrofizzazione o arricchimento in nutrienti, illustrato in Fig. 2.7, può essere definito come un arricchimento eccessivo di nutrienti dei corsi d'acqua. La sua presenza può provocare gravi danni agli ecosistemi, aumento della mortalità della fauna e della flora acquatica e perdita di specie appartenenti ad ambienti a basso nutriente. Ciò comporta una riduzione complessiva della biodiversità di alcuni ambienti ed ha effetti irreversibili sugli animali non acquatici e sugli esseri umani che vivono in questi ecosistemi.

L'eutrofizzazione è misurata attraverso il kg di azoto o gli equivalenti di fosfato, presi come unità di riferimento. In altri termini, l'eutrofizzazione è la misura del grado in cui una sostanza nell'acqua provoca la proliferazione di alghe, prendendo azoto o fosfato come sostanza di riferimento. I principali elementi che contribuiscono all'eutrofizzazione sono composti azotati, quali nitrati, ammoniaca, acido nitrico e composti fosforici, tra cui fosfati e acido fosforico.

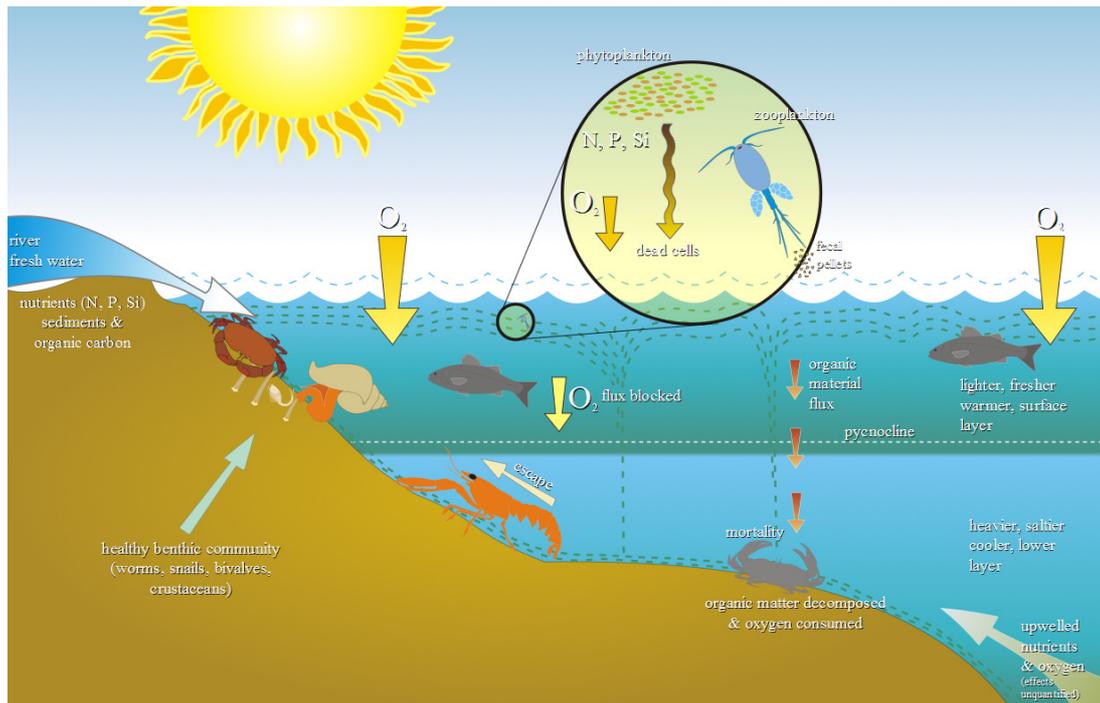


Fig. 2.7: Potenziale di eutrofizzazione (Wikipedia, 2013a)

Se si considera il fosfato come sostanza di riferimento, i fattori di caratterizzazione per le sostanze selezionate sono riportate in Tabella 2.4 (Heijungs et al., 1999).

Tabella 2.4 – Potenziale di eutrofizzazione (in kg PO_4^{3-} eq.) (Heijungs et al., 1999)

	Ammoniaca (NH_3)	Ossidi di azoto (NO_x)	Nitrato (N)	Fosfato (P)
EPI	0.35	0.13	0.10	1.00

Dunque, l'indicatore di eutrofizzazione è dato da:

$$Eutroficazione = \sum_i EP_i \times m_i$$

Eq. (2.5)

dove, m_i (kg) è la massa della sostanza i relative all'aria, acqua e suolo. Detto indicatore è espresso in kg PO_4^{3-} equivalente.

2.3.3.3.4 Potenziale di Creazione di Ozono Fotochimico (Photochemical Ozone Creation Potential, POCP)

Negli ambienti che contengono ossidi di azoto (NO_x) e composti organici volatili (*Volatile Organic Compounds*, VOCs), l'ozono e altri inquinanti atmosferici possono essere generati in presenza di luce solare (Fig. 2.6). Sebbene l'ozono sia fondamentale nell'alta atmosfera per la protezione contro i raggi ultravioletti (UV), a livello basso provoca diversi impatti come danni ai raccolti e una maggiore incidenza di asma e altri disturbi respiratori.

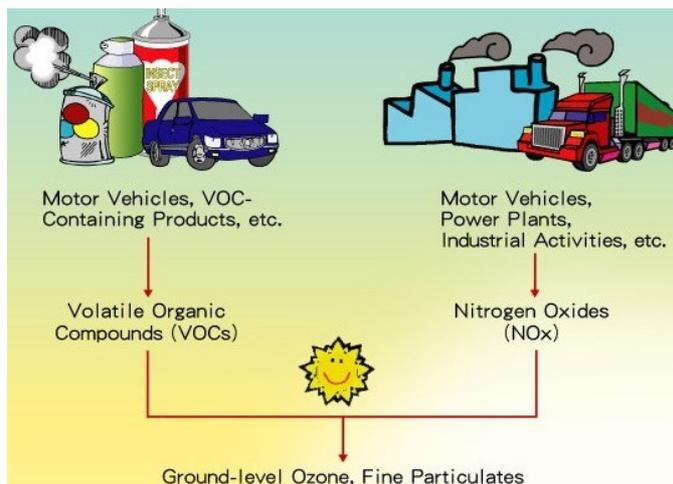


Fig. 2.8: Potenziale di Creazione di Ozono Fotochimico (EPD, 2013)

La manifestazione più comune degli effetti dei gas che contribuiscono alla formazione del Potenziale di Creazione di Ozono Fotochimico (*Photochemical Ozone Creation Potential, POCP*) è costituita dalla presenza di smog nella stagione estiva che risulta particolarmente eccessivo in grandi città come Los Angeles o Pechino. La fonte principale delle emissioni di NO_x è la combustione del carburante, mentre i VOC sono comunemente emessi da solventi, fortemente utilizzati in vernici e rivestimenti.

La categoria di impatto PCOP è la misura della capacità relativa di una sostanza a produrre ozono in presenza di NO_x e di luce solare. Il POCP è espresso attraverso l'etilene impiegato come sos

tanza di riferimento. I fattori di caratterizzazione per il PCOP sono stati sviluppati attraverso il modello pilota della Commissione Economica delle Nazioni Unite per l'Europa (*United Nations Economic Commission for Europe, UNECE*).

I POCP sono stati calcolati rispetto a due scenari (Heijungs et al., 1999):

- (i) uno scenario che considera una concentrazione di base di NO_x relativamente alta;
- (ii) uno scenario che considera una concentrazione di base di NO_x relativamente bassa.

Questi due fattori di caratterizzazione sono riportati nella Tabella 2.5 per alcune sostanze.

Tabella 2.5 – POCP per differenti concentrazioni di NO_x e per alcune sostanze (in kg C₂H₄ eq./kg) (Heijungs et al., 1999)

	POCP per Alta concentrazione di NO _x	POCP per Bassa concentrazione di NO _x
Acetaldeide (CH ₃ CHO)	0.641	0.200
Butano (C ₄ H ₁₀)	0.352	0.500
Monossido di Carbonio (CO)	0.027	0.040
Acetilene (C ₂ H ₂)	0.085	0.400
Metano (CH ₄)	0.006	0.007
Ossido di Azoto (NO _x)	0.028	no data
Propilene (C ₃ H ₆)	1.123	0.600
Ossido di Zolfo (SO _x)	0.048	no data
Toluene (C ₆ H ₅ CH ₃)	0.637	0.500

Pertanto, l'indicatore è dato da:

$$\text{Photo-oxidant formation} = \sum_i \text{POCP}_i \times m_i$$

Eq. (2.6)

dove, m_i è la massa della relativa sostanza i (in kg); tale indicatore è espresso in *kg di etilene (C_2H_4) equivalente*.

Nello studio considerato in questo documento, sono stati considerati soltanto i fattori di caratterizzazione per uno scenario che presenta una concentrazione alta di NO_x .

2.3.3.3.5 Potenziale di Degrado Abiotico (Abiotic Depletion Potential, ADP)

Gli indicatori del degrado abiotico mirano a captare la riduzione della disponibilità di risorse non rinnovabili attraverso la propria estrazione e scarsità nel sottosuolo. In tale contesto, vengono considerati due tipi di indicatori:

- Elementi di Degrado Abiotico, che riguardano l'estrazione di elementi rari (e i loro minerali);
- Energia del Degrado Abiotico/Combustibili Fossili, che riguardano l'uso dei combustibili fossili come combustibile o come materia prima.



Fig. 2.9: Potenziale di Degrado Abiotico (Wikipedia, 2013b)

Il Potenziale di Degrado Abiotico per gli elementi (ADP_{elements}) viene determinato per ogni estrazione di elementi sulla base delle rimanenti riserve e sulla percentuale di estrazione (Fig. 2.9). Tale valore si determina attraverso il rapporto Produzione/Ultime Riserve confrontata con la sostanza di riferimento, Antimonio (Sb) (Guinée et al., 2002). Differenti misurazioni considerano la riserva economica o finale della crosta terrestre.

Il Potenziale di Degrado Abiotico (per Elementi) della risorsa i (ADP_i) è dato dal rapporto tra la quantità di risorsa estratta e le riserve recuperabili della risorsa relativa, espresso in

kg della risorsa di riferimento (antimonio); i fattori di caratterizzazione per alcune risorse selezionate sono indicati nella Tabella 2.6.

Tabella 2.6 – Potenziale di Degrado Abiotico per alcuni elementi (in Sb eq./kg)
(Guinée et al., 2002)

Risorsa	ADP per elementi
Alluminio	1.09E-09
Cadmio	1.57E-01
Rame	1.37E-03
Ferro	5.24E-08
Piombo	6.34E-03

L'indicatore di Degrado Abiotico (Elementi) è dato da,

$$Abiotic\ Depletion = \sum_i ADP_i \times m_i$$

Eq. (2.7)

dove, m_i è la quantità di risorsa estratta i (in kg). Questo indicatore è espresso in *kg di antimonio* (la risorsa di riferimento).

I combustibili fossili sono stati sempre quantificati senza fare alcuna distinzione, tuttavia, a partire dal 2010, è stato introdotto un criterio di calcolo leggermente diverso che prende in considerazione la misura assoluta dell'energia contenuta dal combustibile fossile (Guinée et al., 2002). Tale criterio, non tiene conto, però, della scarsa percentuale di combustibili fossili presenti: tale valore è pari al 17% rappresentato dal carbone (il più comune) e dal gas (il più scarso). L'indicatore di Degrado Abiotico dei Fossili è espresso in MJ.

2.3.4 Interpretazione

L'*interpretazione (Life Cycle Interpretation)* è l'ultima fase dello studio LCA e consente di combinare i risultati dell'analisi dell'inventario (LCI) con quelli della valutazione degli impatti (LCIA). Obiettivo principale di questa fase è quella di formulare le conclusioni dell'intero studio LCA, ricavando i risultati globali dell'analisi. In particolare, i risultati delle tre fasi precedenti dello studio LCA e le scelte effettuate durante l'intero processo dovranno essere verificate, affinché sia garantita coerenza con l'obiettivo ed il campo di applicazione dell'analisi.

2.3.5 Esempio

Al fine di analizzare le varie fasi dell'analisi LCA descritte nei paragrafi precedenti, si riporta di seguito un semplice esempio.

Supponiamo che, per la produzione di 1 kg di un generico materiale usato come isolante, nella fase di inventario (LCI) siano stati raccolti i dati riportati nella seguente Tabella 2.7.

Tabella 2.7 – Dati raccolti sulle emissioni per la produzione di 1 kg di un isolante

Emissioni	Valore (in kg)
monossido di carbonio (CO)	0.12
diossido di carbonio (CO ₂)	0.60
ammoniaca (NH ₃)	0.01
metano (CH ₄)	0.05
ossidi di nitrato (NO _x)	1.02
posforo (P)	0.35
diossido di zolfo (SO ₂)	0.10

Nella successiva fase di valutazione degli impatti (LCIA), si considerino, ad esempio, le seguenti categorie di impatto ambientale:

- (i) potenziale di riscaldamento globale (GWP),
- (ii) potenziale di acidificazione (AP),
- (iii) potenziale di eutrofizzazione (EP).

Per ciascuna categoria di impatto, si definiscano i fattori di caratterizzazione delle emissioni riportati in Tabella 2.8.

Tabella 2.8 – Fattori di caratterizzazione per le categorie di impatto ambientale

	GWP	AP	EP
	(kg CO ₂ eq.)	(kg SO ₂ eq.)	(kg PO ₄ - eq.)
monossido di carbonio (CO)	1.53	-	-
diossido di carbonio (CO ₂)	1.00	-	-
ammoniaca (NH ₃)	-	1.60	0.35
metano (CH ₄)	25.00	-	-
ossidi di nitrato (NO _x)	-	0.50	0.13
posforo (P)	-	-	3.06
diossido di zolfo (SO ₂)	-	1.20	-

Definiti tutti i parametri necessari al calcolo finale, gli indicatori di categoria si ottengono come il prodotto di ogni emissione per il rispettivo fattore di caratterizzazione (ad esempio per il GWP: $0.12 \times 1.53 + 0.60 \times 1.00 + 0,05 \times 23 = 1,93$ kg CO₂ eq); come riportato in Tabella 2.9.

Tabella 2.9 – Risultati finali in termini di indicatori di categoria

GWP (kg CO ₂ eq.)	AP (kg SO ₂ eq.)	EP (kg PO ₄ - eq.)
1.93	0.65	1.21

2.4 Normative europee per la valutazione del ciclo di vita degli edifici

2.4.1 CEN TC350

Nel 2004 la Commissione Europea ha affidato il compito al Comitato Europeo di Normazione (*European Committee for Standardization, CEN*) di sviluppare metodi volontari standardizzati orizzontali per la valutazione della prestazione ambientale integrata degli edifici.

Il Comitato Tecnico (*Technical Commetee, TC*) CEN TC/350, istituito per adempiere al suddetto incarico, ha ampliato i propri obiettivi al fine di sviluppare una metodologia armonizzata che tenga conto della valutazione della sostenibilità delle costruzioni nella sua globalità, secondo un approccio basato sul ciclo di vita. In questo modo le norme e gli standard sviluppati potranno essere applicati in modo da garantire una valutazione integrata degli edifici, considerando non solo la prestazione ambientale, ma anche quella economica e sociale. Di conseguenza, ad oggi il quadro di riferimento normativo per la valutazione della sostenibilità degli edifici, fornita dalla serie di norme CEN-TC 350, riguarda gli aspetti ambientali, economici e sociali (EN 15643-1, 2010), come è illustrato in Figura 2.10.

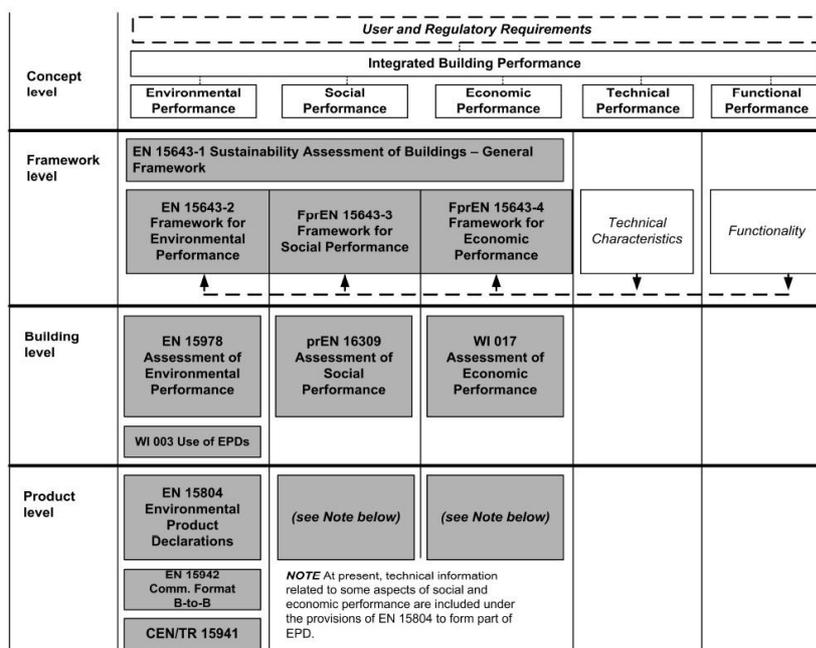


Fig. 2.10: Programma di lavoro del CEN TC350 (EN 15643-1, 2010)

Il lavoro del TC si è concentrato su quattro livelli (concezione/ quadro di riferimento/ edificio/ prodotto) e su cinque tipi di prestazioni (ambientale/ sociale/ economica/ tecnica/ funzionale). La valutazione della prestazione ambientale è l'aspetto più completo sviluppato dal TC/350, poiché è caratterizzato da norme elaborate sia a livello di edificio, che a livello di prodotto da costruzione.

L'approccio ambientale basato sul ciclo di vita considerato in questo volume si basa sulle due norme dedicate alla valutazione degli impatti ambientali, ovvero la EN 15978 (2011) a livello di edificio e la EN 15804 (2012) a livello di prodotto.

2.4.2 Normativa a livello di edificio (EN 15978)

Lo standard EN 15978 (2011) specifica le regole per la valutazione della prestazione ambientale degli edifici di nuova costruzione ed esistenti, basata sul concetto di ciclo di vita. Tale norma vuole essere uno strumento di supporto al processo decisionale e nel documentare i risultati della valutazione delle prestazioni ambientali di un edificio.

Per avere una visione completa della metodologia si suggerisce di leggere con attenzione la norma; nei paragrafi che seguono saranno approfonditi i seguenti argomenti: *l'equivalente funzionale*, *le fasi del ciclo di vita* e *gli indicatori ambientali*.

2.4.2.1 Equivalente funzionale

Nell'ambito della norma si definisce '*equivalente funzionale*' l'insieme - quantificato - dei requisiti funzionali e/o dei requisiti tecnologici di un edificio o di un sistema assemblato (parte della costruzione) usato come base di riferimento per il confronto. Il confronto tra edifici o sistemi sarà dunque ammesso solo se le funzioni previste sono le stesse. Gli aspetti minimi da includere per definire l' '*equivalente funzionale*' di un edificio sono:

- (i) la tipologia edilizia (per esempio edificio residenziale, edificio per uffici, etc);
- (ii) la modalità di utilizzo;
- (iii) i requisiti tecnici e funzionali;
- (iv) la vita utile richiesta.

2.4.2.2 Le fasi del ciclo di vita

I confini del sistema stabiliscono il campo di applicazione dell'analisi del ciclo di vita, determinando i processi da considerare nell'analisi. Come indicato nella norma, la valutazione ambientale "comprende tutti i processi a monte e a valle necessari per definire e mantenere la(e) funzione(i) dell'edificio".

Naturalmente, è necessario avere informazioni sui prodotti impiegati per la costruzione dell'edificio al fine di valutare la prestazione ambientale globale. Tali informazioni dovrebbero essere coerenti, quindi seguire le norme di categoria in accordo allo standard EN 15804 (si veda il paragrafo successivo).

Questa norma permette di schematizzare il ciclo di vita di un edificio secondo un sistema modulare, tale che ogni fase sia suddivisa in una serie di sotto-sistemi: “moduli”, come illustrato in Figura 2.11.

La *fase di produzione* comprende i moduli da A1 a A3, la *fase di costruzione* è costituita dai moduli A4 e A5, la *fase d'uso* include i moduli da B1 a B7, la *fase di fine vita* comprende i moduli da C1 a C4, infine, il modulo D include i benefici e i carichi al di fuori del confine del sistema. Nei paragrafi seguenti verrà fornita una breve descrizione delle varie fasi del ciclo di vita e dei moduli corrispondenti.

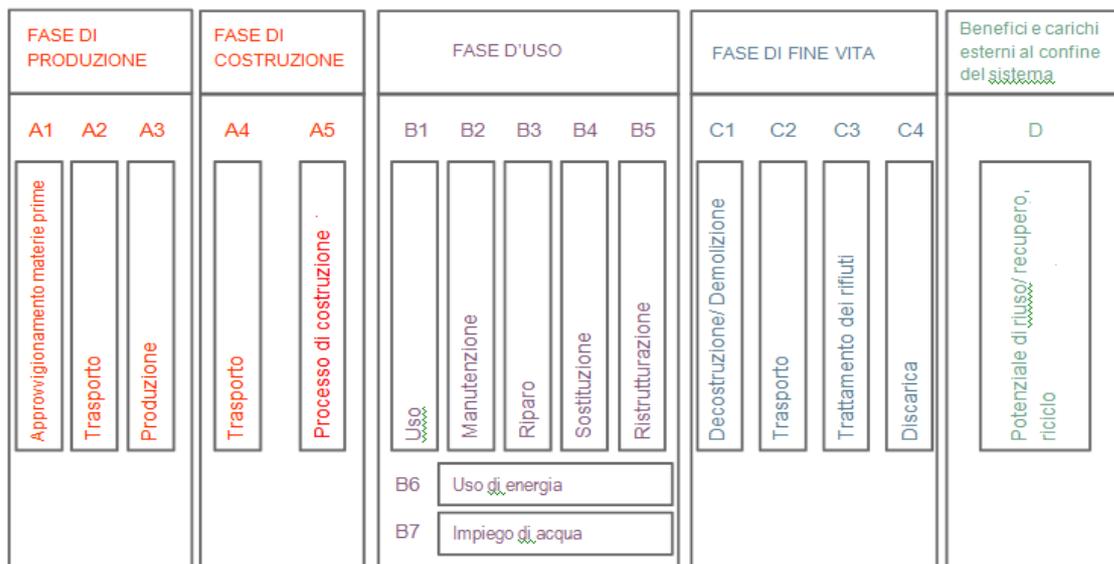


Fig. 2.11: Schema a moduli del ciclo di vita di un edificio (EN 15978, 2011)

2.4.2.2.1 Fase di Produzione

La *fase della produzione* include i moduli da A1 a A3. Il confine del sistema è definito in modo da poter includere quei processi che definiscono i flussi in ingresso (in termini di materia ed energia) della produzione, del trasporto fino al cancello e di qualsiasi tipo di rifiuto derivante da essi. In particolare, questa fase comprende:

- ✓ A1 – Estrazione e lavorazione delle materie prime, riutilizzo dei prodotti o materiali da un sistema di prodotto precedente, trattamento di materiali secondari utilizzati come input per la realizzazione del prodotto;
- ✓ A2 - Trasporto fino al cancello della fabbrica e trasporto interno;
- ✓ A3 – Produzione di materiali accessori, fabbricazione di prodotti e sottoprodotti; e produzione degli imballaggi.

2.4.2.2.2 Fase di Costruzione

La *fase di costruzione* comprende i moduli relativi a:

- ✓ A4 - Trasporto dal cancello di produzione al cantiere;
- ✓ A5 – Installazione del prodotto nell'edificio compresa la fabbricazione e il trasporto dei materiali accessori e di qualsiasi energia o di acqua necessaria per l'installazione o il funzionamento e le opere di cantiere.

2.4.2.2.3 Fase d'uso

La *fase d'uso* comprende due tipologie di moduli: moduli relativi alla struttura dell'edificio (B1-B5) e moduli relativi al suo funzionamento (B6-B7). In particolare:

- ✓ B1 – Utilizzo del prodotto installato in termini di emissioni ambientali prodotte dai componenti dell'edificio e dai lavori di costruzione durante il loro normale impiego (cioè previsto a priori);
- ✓ B2 – Manutenzione, che riguarda tutte le attività tecniche programmate e le corrispondenti azioni amministrative da svolgere durante la vita utile affinché il prodotto installato in un edificio possa garantire sia le prestazioni tecniche e funzionali previste, che la conservazione delle qualità estetiche del prodotto;
- ✓ B3 – Riparazione, che riguarda tutte le attività tecniche e le corrispondenti azioni amministrative da svolgere durante la vita utile, legate al trattamento correttivo, di risposta o reazione, di un prodotto da costruzione o delle sue parti installate nell'edificio al fine di riportarlo ad una condizione accettabile in cui possa svolgere le prestazioni tecniche e funzionali richieste;
- ✓ B4 – Sostituzione, che riguarda tutte le attività tecniche e le corrispondenti azioni amministrative da svolgere durante la vita utile, in modo da riportare un prodotto da costruzione alla condizione di poter esercitare la sua prestazione funzionale o tecnica richiesta, attraverso la sostituzione di un elemento costruttivo;
- ✓ B5 – Ristrutturazione, che riguarda tutte le attività tecniche e le corrispondenti azioni amministrative da svolgere durante la vita utile di un prodotto, al fine di riportare un edificio ad una condizione in cui può assolvere alle funzioni richieste;
- ✓ B6 – Consumo di energia per il funzionamento degli impianti tecnici integrati degli edifici, insieme agli aspetti ed impatti ambientali associati, incluso il trattamento e trasporto di qualsiasi rifiuto;
- ✓ B7 – Impiego di acqua insieme agli aspetti ed impatti ambientali associati che considerano il ciclo di vita delle acque tra cui la produzione e il trasporto e il trattamento delle acque reflue.

2.4.2.2.4 Fase di Fine Vita

La *fase di fine vita* dell'edificio comprende tutti i flussi in uscita che hanno raggiunto lo stato di "rifiuto", derivante dallo smantellamento, decostruzione o demolizione dell'edificio. Tale fase include i seguenti moduli:

- ✓ C1 – Decostruzione, che riguarda lo smantellamento o la demolizione, del prodotto dell'edificio, compresa la fase di separazione dei materiali in cantiere;
- ✓ C2 – Trasporto del prodotto di scarto quando è parte del processo di trattamento dei rifiuti, ad esempio, ad un sito di riciclaggio e trasporto dei rifiuti, per esempio, allo smaltimento finale;
- ✓ C3 – Processo di trattamento dei rifiuti ad esempio la raccolta di parte dei rifiuti dalla decostruzione e processo di trattamento rifiuti dei materiali di scarto volti al riutilizzo, riciclaggio e al recupero di energia;
- ✓ C4 – Smaltimento dei rifiuti, compreso il pre-trattamento fisico e la gestione del sito di smaltimento.

2.4.2.2.5 Guadagni e carichi oltre il confine del sistema

Il modulo D comprende tutti i benefici netti o carichi generati da prodotti riutilizzabili e riciclabili e/o i carichi di energia forniti, per un esempio, da un prodotto come materiali secondari o combustibili.

2.4.2.3 Valutazione degli impatti ambientali

In relazione alla fase di valutazione degli impatti, la norma EN 15978 considera due categorie di impatto ambientale, ovvero *indicatori degli impatti ambientali* e *indicatori ambientali dei flussi in ingresso e in uscita*.

2.4.2.3.1 Indicatori degli impatti ambientali

Per la descrizione degli impatti ambientali, si considerano i sei indicatori riportati in Tabella 2.10, già descritti nel precedente paragrafo.

Tabella 2.10 – Indicatori degli impatti ambientali (EN15978)

Indicatore	Unità di misura
Potenziale di riscaldamento globale (GWP)	kg CO ₂ equiv
Potenziale di eliminazione dello strato di ozono stratosferico (ODP)	kg CFC 11 equiv
Potenziale di acidificazione della terra e dell'acqua (AP)	kg SO ₂ ⁻ equiv
Potenziale di eutrofizzazione (EP)	kg (PO ₄) ³⁻ equiv
Potenziale di creazione di ossidanti fotochimica dell'ozono troposferico (POCP)	kg Ethene equiv
Potenziale di degrade delle risorse abiotiche per elementi (ADP_elementi)	kg Sb equiv
Potenziale di degrade delle risorse abiotiche per i combustibili fossili (ADP_combustibili fossili)	MJ

2.4.2.3.2 Indicatori dei flussi in ingresso e in uscita

I flussi in ingresso e in uscita vengono descritti da altri indicatori relativi all'impiego delle risorse (Tabella 2.11). Questi indicatori descrivono l'impiego dell'energia primaria prodotta da fonti rinnovabili e non rinnovabili e da risorse idriche e sono calcolati direttamente dai flussi in ingresso dell'analisi dell'inventario (LCI). Esistono, inoltre, indicatori legati direttamente ai flussi in ingresso dell'analisi LCI che descrivono le categorie di rifiuto (Tabella 2.12) e indicatori relativi ai flussi in uscita (Tabella 2.13). Per poter quantificare tali indicatori, si considerano alcuni scenari creati per ciascun processo.

Tabella 2.11 – Indicatori dell'uso delle risorse (EN15978)

Indicatori	Unità di misura
Impiego di energia primaria da fonti rinnovabili escluse le risorse di energia utilizzate come materia prima	MJ, potere calorifico netto
Impiego di risorse per l'energia primaria da fonti rinnovabili utilizzate come materia prima	MJ, potere calorifico netto
Impiego dell'energia primaria da fonti non rinnovabili escluse le risorse di energia primaria utilizzata come materia prima	MJ, potere calorifico netto
Impiego di risorse di energia primaria da fonti non rinnovabili utilizzate come materie prime	MJ, potere calorifico netto
Impiego di materiale secondario	kg
Impiego di combustibili secondari rinnovabili	MJ
Impiego di combustibili secondari non rinnovabili	MJ
Impiego di acqua dolce	m ³

Tabella 2.12 – Indicatori delle categorie di rifiuto (EN15978)

Indicatore	Unità di misura
Rifiuti pericolosi smaltiti	kg
Rifiuti non pericolosi smaltiti	kg
Rifiuti radioattivi smaltiti	kg

Tabella 2.13 – Indicatori dei flussi in uscita del sistema (EN15978)

Indicatore	Unità di misura
Componenti per il riuso	kg
Materiali per il riciclo	kg
Materiali per il recupero di energia (non essendo incenerimento dei rifiuti)	kg
Energia esportata	MJ per ogni veicolo energetico

2.4.3 Normativa a livello di prodotto (EN 15804)

La normativa EN 15804 fornisce, a scala di prodotto, le regole per la Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (*Environmental Product Declarations*, EPD) dei prodotti da costruzione. Le dichiarazioni ambientali di Tipo III, in accordo alla norma ISO 14025 (2006), sono spesso una buona fonte di dati ambientali per l'analisi del ciclo di vita.

Una dichiarazione EPD è un particolare tipo di analisi LCA, condotta secondo una serie di Regole di Categoria del Prodotto (*Product Category Rules*, PCR) (Fig. 2.12). Molte PCR possono essere utilizzate per prodotti da costruzione (CPA, 2012) ma possono essere confrontate solo le EPD che seguono le stesse PCR.

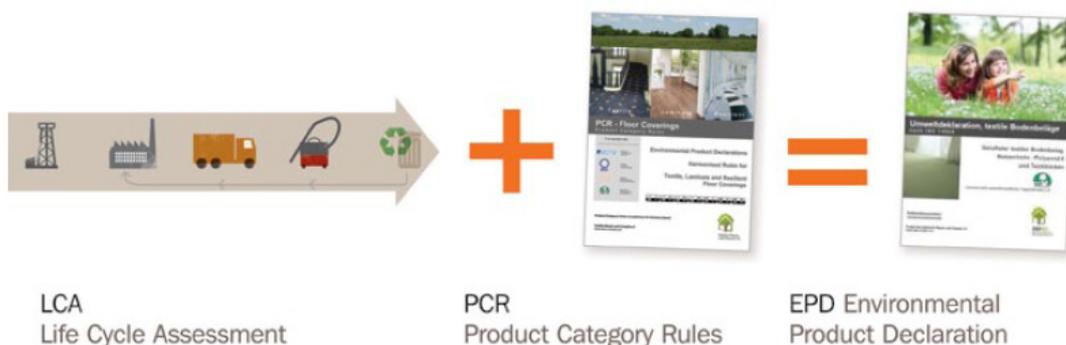


Fig. 2.12: EPD (CPA, 2012)

L'obiettivo della norma EN 15804 è quello di fornire informazioni coerenti, comparabili e affidabili a livello dell'intero edificio.

Sebbene le regole di calcolo e il campo di applicazione di un'analisi LCA a livello di prodotto risultino simili a quelle precedentemente descritte a livello dell'edificio, (Fig. 2.11) la norma EN 15804 considera obbligatoria la descrizione della sola fase di produzione (che comprende i moduli da A1 a A3), lasciando facoltative le altre fasi del ciclo di vita.

Allo stesso modo, l'unità funzionale fornisce un riferimento attraverso il quale i flussi del materiale che derivano dai risultati di un'analisi LCA di un prodotto da costruzione, sono normalizzati. Tuttavia, questo standard introduce l'*unità dichiarata* che può sostituire l'unità funzionale, qualora la funzione del prodotto, a livello di edificio, non sia indicata oppure non sia nota.

2.5 Altre normative e regolamenti (soprattutto per la fase d'uso)

La normativa EN15978 (2011), come descritto in precedenza, assegna tutti i potenziali impatti ambientali relativi all'edificio, considerando l'intero ciclo di vita secondo un sistema a moduli (Fig. 2.11).

In particolare, nel Modulo B6, relativo all'uso di energia, si quantifica, per esempio, l'energia impiegata dagli impianti integrati nell'edificio durante la sua fase di esercizio. Per questo motivo, è necessario includere il consumo di energia per il raffrescamento, il riscaldamento, la produzione di acqua calda sanitaria (ACS), la ventilazione,

l'illuminazione e l'energia ausiliaria utilizzata per le pompe, il controllo e l'automazione. La normativa EN15978 non fornisce le regole per il calcolo dell'energia, perciò risulta opportuno consultare la Direttiva sull'Efficienza Energetica degli Edifici (EU 2002) e le sue implementazioni nazionali.

La Direttiva sull'Efficienza Energetica degli Edifici è il principale strumento legislativo a livello europeo per definire la prestazione energetica degli edifici e si fonda su quattro punti cardine che dovrebbero essere applicati dagli Stati Membri (EU 2002):

- ✓ Metodologia comune per il calcolo integrato della prestazione energetica degli edifici;
- ✓ standard minimi sul rendimento energetico degli edifici di nuova costruzione e esistenti, soggetti ad importanti ristrutturazioni;
- ✓ Sistemi per la certificazione energetica di edifici di nuova costruzione ed esistenti e per gli edifici pubblici, l'affissione di documenti e di altre informazioni pertinenti.
- ✓ Manutenzione periodica di caldaie e impianti centralizzati di condizionamento d'aria negli edifici, nonché inoltre valutazione degli impianti di riscaldamento nei casi in cui le caldaie abbiano più di 15 anni.

La revisione della Direttiva, avvenuta nel 2010 stabilisce un quadro giuridico di aggiornamento dei codici edilizi nazionali e presenta una politica per incentivare l'utilizzo di edifici a energia quasi zero, tale che tutti i nuovi edifici saranno progettati in modo da avere un dispendio energetico quasi pari a zero a partire dal 2020 (a titolo di esempio, in Figura 2.12 sono riportate le caratteristiche principali per un edificio a consumo energetico zero).

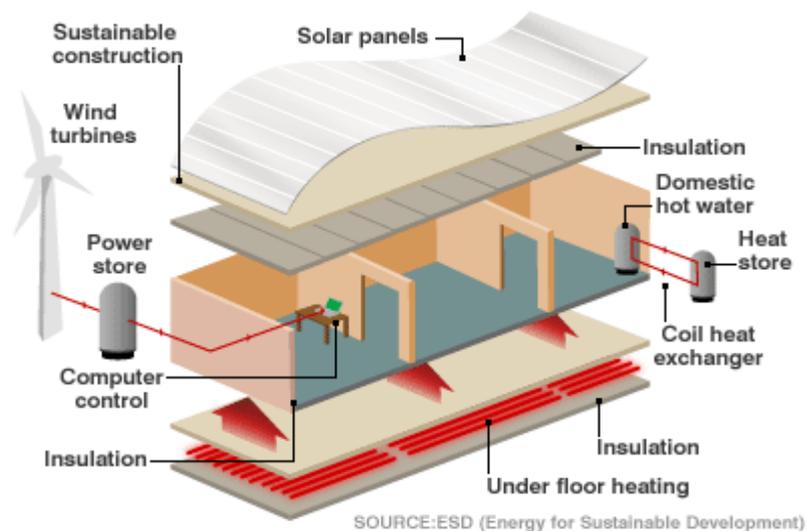


Fig. 2.13: Principali caratteristiche di un edificio a consumo zero

Nonostante la Direttiva fornisca requisiti generali per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, non viene illustrato un metodo di calcolo specifico per condurre

questa analisi; per questo motivo ogni Stato Membro della CE potrà operare in maniera differente ed indipendente.

La maggior parte dei Paesi utilizza le normative CEN o altre normative internazionali. A tal proposito, gli altri standard considerati in questo documento sono:

- (i) ISO 13790 (2008), I norma relativa a tutti i componenti del riscaldamento coinvolti nei calcoli termici che fornisce i fattori di correzione per poter considerare anche gli effetti termici dinamici;
- (ii) EN 15316-3-1 (2007), I norma riguardante il fabbisogno energetico per la produzione di acqua calda sanitaria (ACS).

3 METODOLOGIE SEMPLIFICATE PER LA VALUTAZIONE DEGLI EDIFICI

3.1 Introduzione

Il settore delle costruzioni è sempre più chiamato a rispondere alle esigenze di sostenibilità attraverso le dichiarazioni ambientali di prodotto, la realizzazione di edifici a bassi consumi energetici, ecc., ma non sempre gli attori coinvolti nel settore non hanno una formazione adeguata in materia o un'esperienza tale da poter affrontare in maniera esaustiva e completa la questione degli impatti ambientali dei prodotti da costruzione.

Le prestazioni termiche degli edifici di nuova costruzione sono regolate da un quadro legislativo consolidato da alcuni anni, che permette ai progettisti di acquisire una buona conoscenza della fase d'uso degli edifici, garantendo così anche il controllo della stessa.

Al contrario, le tematiche relative all'energia incorporata e all'impronta di carbonio dei materiali, risultano ancora poco conosciuti, anche se progressivamente stanno iniziando ad essere inseriti nei bandi di gara. Pochi sono gli specialisti che sono in grado di affrontare entrambe le questioni summenzionate.

Alla luce di queste considerazioni, al fine di promuovere l'implementazione di analisi a ciclo di vita nel settore edile, nel presente capitolo si introducono due metodologie di analisi semplificate:

- (i) la prima considera un approccio per l'analisi sul ciclo di vita basato sui macro-componenti;
- (ii) la seconda segue un approccio per il calcolo del fabbisogno energetico necessario per garantire il raffrescamento e il riscaldamento degli ambienti di un edificio, includendo l'energia per la produzione di acqua calda sanitaria.

Entrambi gli approcci sono stati sviluppati nell'ambito del progetto di Ricerca Europeo *SB_Steel* (2014) e si basano sui principi delle recenti norme europee EN 15978 e EN 15804.

Nei successivi paragrafi, dopo un'accurata descrizione dell'approccio basato sul ciclo di vita per i macro-componenti, verrà presentato l'approccio semplificato per il calcolo del fabbisogno energetico, esponendo la procedura di calibrazione corrispondente.

3.2 Algoritmo per la valutazione basata sul ciclo di vita per i macro-componenti

La composizione dell'edificio, in termini di partizioni esterne ed interne, gioca un ruolo fondamentale nella valutazione del comportamento termico della struttura in termini di consumi energetici e carichi ambientali. A tal proposito risulta particolarmente vantaggioso, ai fini della valutazione ambientale, utilizzare soluzioni progettuali pre-assemblate per i principali componenti dell'edificio, definite macro-componenti, ovvero componenti edilizi che derivano dall'assemblaggio di diversi materiali e che compongono un pacchetto tecnologico finito dell'edificio (Gervásio et al., 2014).

Per ogni componente dell'edificio, sono state pre-assemblate differenti soluzioni ed il modello utilizzato per l'analisi ambientale dell'edificio nel ciclo di vita, basata sui macro-componenti, sarà descritto in maniera dettagliata nei paragrafi successivi.

3.2.1 Fasi generali

3.2.1.1 Obiettivo e campo di applicazione

L'obiettivo dello strumento è quello di quantificare gli impatti ambientali di un semplice edificio o dei suoi componenti (espressi al m²), attraverso l'uso di macro-componenti predefiniti. Tale approccio consente, pertanto, di condurre un'analisi a due diversi livelli: (i) a livello di componente; (ii) a livello di edificio.

3.2.1.1.1 Unità funzionale

A livello di edificio, l'unità funzionale è rappresentata da un edificio di data tipologia (ad esempio edificio residenziale, edificio per uffici, ecc), progettato per una determinata vita utile (ad esempio 50 anni) secondo determinati requisiti standard da soddisfare.

A livello di componente edilizio, l'unità funzionale (espressa al m²) è costituita da un componente edilizio (per esempio una parete esterna, un solaio, ecc), impiegato per una vita utile di progetto predefinita (ad esempio 50 anni). In questo caso, la funzione del componente edilizio può essere inclusa o meno nell'analisi, a seconda dell'obiettivo che si voglia perseguire: ad esempio, se si decide di procedere ad un confronto tra componenti edilizi sarebbe opportuno considerare il parametro 'funzione' in fase di analisi.

3.2.1.1.2 Confini del sistema

L'analisi ambientale basata sul ciclo di vita comprende la fase di produzione del materiale (moduli da A1 a A3), la fase di costruzione (modulo A4), la fase d'uso (moduli da B1 a B5), la fase di fine vita (moduli da C1 a C4) e i benefici e i carichi in relazione ai processi di riciclo (modulo D), come indicato nella Tabella 3.1.

Prima di procedere alla descrizione del metodo a macro-componenti, è opportuno fare alcune precisazioni riguardo i confini del sistema. In particolare sono stati trascurati i moduli A5, B1, B6 e B7; tuttavia si procederà alla descrizione degli aspetti caratteristici del modulo B6, relativo all'uso di energia..

Inoltre è stato possibile trascurare, a livello di edificio, la valutazione degli impatti dovuti al processo di costruzione (modulo A5), che include anche l'uso di attrezzature, le operazioni di cantiere e la produzione di rifiuti (Gervásio et al., 2014).

Il modulo B1 riguarda le emissioni causate dall'impiego dei materiali installati nell'edificio che non sono incluse nei restanti moduli della fase d'uso. Questo modulo ha poca rilevanza nell'ambito della valutazione LCA che si vuole condurre, poiché, grazie alle severe normative, attualmente in vigore, sono presenti sul mercato materiali da

costruzione a bassa emissione. Infine, è stato possibile trascurare anche l'impiego di acqua (modulo B7), in quanto non dipende dalle scelte di costruzione.

Tabella 3.1: Moduli del ciclo di vita di un edificio (EN 15643-2:2011)

Fase di produzione			Fase di costruzione		Fase d'uso							Fase di fine vita				
Approvvigionamento materie prime	Trasporto	Produzione	Trasporto	Processo di costruzione	Uso	Manutenzione	Riparo	Sostituzione	Ristrutturazione	Uso di energia	Impiego di acqua	Demolizione	Trasporto	Trattamento dei rifiuti	Rifiuti	Potenziale di riuso/riciclo
A 1	A 2	A 3	A 4	A 5	B 1	B 2	B 3	B 4	B 5	B 6	B 7	C 1	C 2	C 3	C 4	D
x	x	x	x	-	-	x	x	x	x	x	-	x	x	x	x	x

3.2.1.2 L'inventario

Il controllo della qualità dei dati è un requisito richiesto dalle norme che regolano le analisi LCA, perciò i dati relativi ai prodotti da costruzione dovrebbero essere esaminati e verificati in base alle seguenti condizioni (EN 15804):

- Copertura temporale: i dati relativi alle informazioni generali e alle note specifiche del produttore dovrebbero essere aggiornati con una cadenza temporale rispettivamente di 10 e 5 anni;
- I dati raccolti dovrebbero essere ricavati da informazioni recenti;
- Copertura geografica: i dati raccolti dovrebbero riflettere l'area geografica del prodotto o dei gruppi di prodotto considerati;
- Copertura tecnologica: i dati raccolti dovrebbero riflettere la reale natura fisica del prodotto o dei gruppi di prodotto considerati;
- Completezza: i dati raccolti dovrebbero contenere tutte le informazioni presenti nei confini del sistema, secondo i limiti fissati dai criteri di esclusione dei flussi in ingresso e in uscita.

La maggior parte dei dati ambientali sono forniti dal database internazionale PE (2006), ad eccezione dei dati relativi all'acciaio, messi a disposizione da Worldsteel Association (2002), in collaborazione con PE International. In questo modo si assicura non solo una buona consistenza di raccolta e gestione dei dati relativi ai principali materiali impiegati, ma anche una metodologia valida e completa per la fase di allocazione e per le regole di *cut-off* (Tabella 3.2).

Tabella 3.2: Controllo della qualità per i principali materiali dei macro-componenti

	Copertura temporale	Copertura geografica	Copertura tecnologica	Completezzas
Profili in acciaio	2007, media annuale	Europa	Produttori europei	> 99% di massa ed energia
Barre in acciaio	2007, media annuale	Mondo	Produttori mondiali	> 99% di massa ed energia
Lamine in acciaio	2007, media annuale	Europe	European producers	> 99% di massa ed energia
Calcestruzzo C20/25	2011, media annuale	Germania	Produttori tedeschi	> 95% di massa ed energia
Pannelli OSB	2008, media annuale	Germania	Produttori tedeschi	> 99% di massa ed energia
Pannelli in cartongesso	2008, media annuale	Europa	Produttori europei	> 95% di massa ed energia
Mattoni	2011, media annuale	Germania	Produttori tedeschi	> 95% di massa ed energia
Pannello in lana di roccia	2011, media annuale	Europa	Produttori europei	> 95% di massa ed energia
Polistirene espanso EPS	2011, nessun dato	Europa	No data	Nessun dato
Polistirene estruso XPS	2011, media annuale	Germania	Produttori tedeschi	> 95% di massa ed energia
Schiuma rigida in poliuretano PUR	2011, media annuale	Germania	Produttori tedeschi	> 95% di massa ed energia
Sughero espanso	2011, media annuale	Germania	Produttori tedeschi	> 95% di massa ed energia
Lana di vetro	2011, media annuale	Europa	Produttori europei	> 95% di massa ed energia
Schiuma in polietilene PE	2011, media annuale	Germania	Produttori tedeschi	> 95% di massa ed energia

3.2.1.3 Valutazione degli impatti

Le categorie di impatto ambientale da considerare per l'edificio Tabella 2.10 corrispondono a quelle raccomandate negli standard europei per la valutazione della prestazione ambientale degli edifici (EN 15643-2 e EN 15978).

In accordo alle norme appena citate, il ciclo di vita segue il sistema modulare secondo il quale ogni fase del ciclo di vita è suddivisa in una serie di moduli. Questa schematizzazione, adottata nell'approccio in esame, consente di ottenere il risultato dell'analisi ambientale di ogni macro-componente in relazione ad ogni singolo modulo oppure come valore totale di ciascuna fase.

In particolare, è opportuno evidenziare che l'analisi degli impatti ambientali di ogni macro componente è stata effettuata attraverso il software GaBi (2012).

3.2.2 Allocazione dei materiali riciclati

L'acciaio è un materiale completamente riciclabile e gli scarti possono essere trasformati mantenendo la stessa qualità del materiale originario, rispetto al processo di produzione e di riciclo (Worldsteel Association, 2009). Alla luce di questa considerazione, nella fase di fine vita di un edificio in acciaio, la struttura potrà essere smontata e l'acciaio sarà riciclato o riutilizzato in maniera parziale o totale. Secondo i dati forniti dall'istituto di ricerca "Steel Recycling Institute" (2009), nel Nord America, il tasso di riciclo dell'acciaio strutturale è pari a circa il 97,5%. I grafici in Figura 3.1 mostrano, rispettivamente, l'andamento delle percentuali di riciclo dell'acciaio strutturale e dell'acciaio da armatura nel settore delle costruzioni.

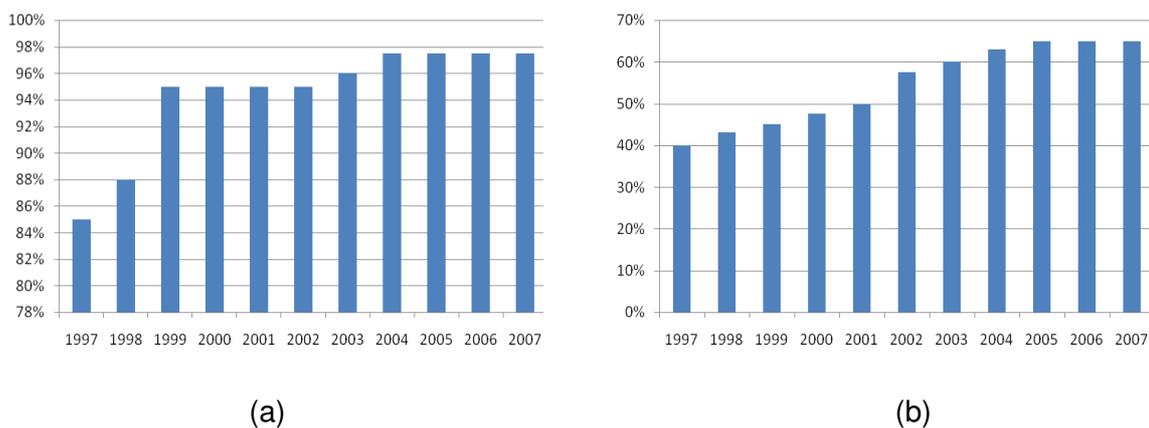


Fig. 3.1: Andamento delle percentuali di riciclo dell'acciaio strutturale (a) e dell'acciaio da armatura (b) (Steel Recycling Institute, 2009)

Il riuso e il riciclo dell'acciaio sono processi multifunzionali, perciò richiedono l'uso di una procedura di allocazione, che sarà descritta in dettaglio nei successivi paragrafi.

3.2.2.1 *Introduzione*

La maggior parte dei processi industriali sono multifunzionali; il processo di produzione genera, infatti, più di un prodotto e i flussi in ingresso associati alla produzione includono, spesso, prodotti intermedi o scartati. Per questo motivo, si procede attraverso l'allocazione qualora sia necessario suddividere i flussi in ingresso e in uscita (in termini di materia ed energia) per ciascuna unità funzionale inclusa nel sistema di prodotto in esame.

Il processo di allocazione, definito dalla norma ISO 14040 (2006) come la "ripartizione dei flussi in ingresso o uscita di un processo unitario (o di un sistema-prodotto) appartenente al sistema-prodotto studiato (o a più di un sistema)", indirizza la distribuzione dei flussi tra le unità di processo o dei sistemi di prodotto.

In linea di principio è preferibile evitare la procedura di allocazione. La norma ISO 14044 (2006), suggerisce due modi per raggiungere tale fine: il primo consiste nella suddivisione del processo unitario in due o più sotto-processi in modo che ciascuno svolga una sola funzione e nella successiva raccolta dei dati di ingresso e di uscita relativi ai soli sottoprocessi di interesse; il secondo prevede l'espansione del sistema produttivo in modo da includere anche le funzioni aggiuntive relative ai sottoprodotti (espansione del sistema).

L'espansione del sistema prevede un approccio basato sul carico evitato, con il quale si eliminano dal processo multifunzionale le funzioni in eccesso mediante la sottrazione dei processi monofunzionali equivalenti, in modo da ottenere un unico processo monofunzionale.

L'allocazione è inevitabile quando sia la suddivisione dei processi che l'espansione del sistema non sono in linea con l'obiettivo dello studio. In tal caso, la norma ISO 14044 (2006) raccomanda due possibili soluzioni: (i) ripartire i flussi del sistema in ingresso e in uscita in base a relazioni di causa fisiche (chimiche o biologiche); (ii) ripartire i flussi in base ad altri criteri (per esempio in base al valore economico dei prodotti).

La possibilità di riusare e di riciclare i materiali è strettamente connessa alla multifunzionalità dei relativi processi che comporta l'utilizzo di procedure di allocazione. I principi e i criteri di allocazione, appena descritti, si applicano anche ai processi di riciclo e riuso, sebbene in questo caso, bisognerà tenere conto dei cambiamenti delle proprietà intrinseche dei materiali per scegliere in modo opportuno la procedura di allocazione da utilizzare (ISO 14044, 2006).

In tale ottica, si possono verificare tre situazioni possibili (Werner, 2005):

- i) le proprietà intrinseche del materiale non cambiano e viene riutilizzato per la stessa funzione;
- ii) le proprietà intrinseche del materiale cambiano e viene riutilizzato per la stessa funzione;
- iii) le proprietà intrinseche del materiale cambiano e viene riutilizzato per altre funzioni;

Nel primo caso, si verifica una condizione a ciclo-chiuso, in cui si considera che la sostituzione del materiale primario sia completa, quindi nessun carico ambientale,

derivante dalla produzione di materiale primario o dallo smaltimento finale, verrà allocato al sistema di prodotto.

Il secondo caso corrisponde ad un approccio a ciclo-aperto, in cui, tuttavia, si ipotizza una condizione a ciclo-chiuso. In questa situazione, le proprietà del materiale modificato sono irrilevanti, perciò il processo di riciclo sarà ricondotto ad una situazione di ciclo-chiuso. Infine, nell'ultimo caso, si presenta una situazione ad anello aperto, in cui si ipotizza una sostituzione parziale del materiale primario. Questa condizione comporta l'allocazione parziale dei carichi ambientali dovuti alla produzione della materia prima o allo smaltimento.

In accordo alla norma ISO 14044 (2006), bisogna evitare l'allocazione in caso di condizione a ciclo-chiuso, in quanto l'uso di materiale secondario sostituisce l'uso di materie prime.

3.2.2.2 Allocazione degli scarti evitati

Gli scarti generati durante il ciclo di vita dell'acciaio derivano dalla fase di produzione, dalla fase di costruzione e dalla fase di fine vita (Fig. 3.2), perciò è opportuno considerare una procedura di allocazione per i flussi in uscita degli scarti di tutto il ciclo di vita del sistema. Inoltre, come sarà descritto in seguito, l'acciaio subisce diversi processi di trasformazione durante la fase di produzione, quindi, l'allocazione dei flussi in ingresso degli scarti relativi all'azienda siderurgica, è un ulteriore aspetto da considerare.

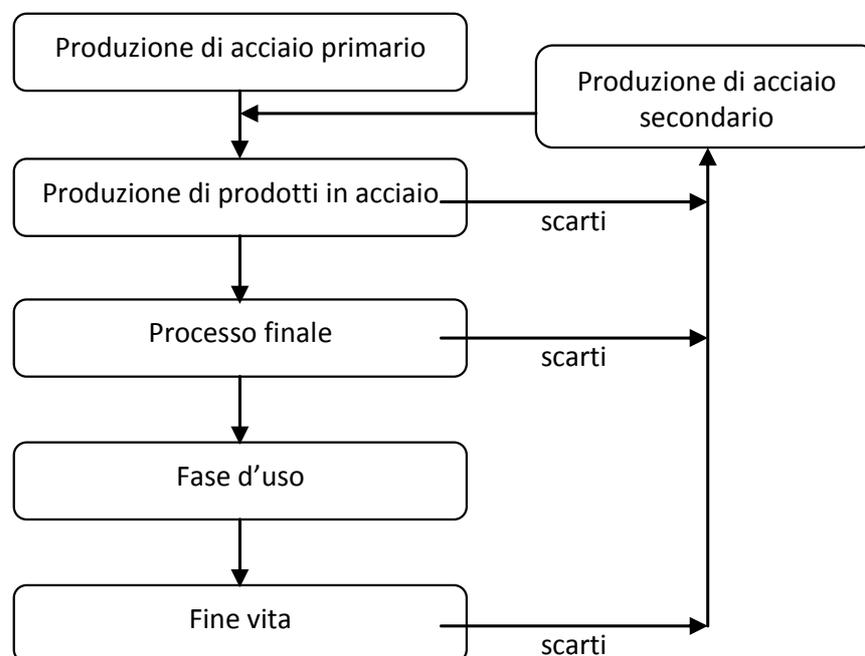


Fig. 3.2: Confini del sistema di una LC inclusi i dati del fine vita relativi agli scarti (LCI, 2002)

L'acciaio può essere riciclato e riusato più volte; dunque, un adeguato metodo di allocazione risulta necessario per affrontare il riciclo multiplo e il riutilizzo dei componenti in acciaio.

Il metodo adottato per affrontare il problema dell'allocazione dell'acciaio è l'approccio di riciclo a circuito chiuso, sviluppato dalla Worldsteel Association al fine di raccogliere dati per l'analisi di inventario dei prodotti siderurgici (LCI, 2002).

La scelta di un metodo a ciclo-chiuso consente di ottenere nuovi prodotti in acciaio con le stesse caratteristiche intrinseche del materiale, in quanto gli scarti impiegati per la loro realizzazione vengono nuovamente fusi.

In tal caso, secondo quanto descritto nella norma ISO 14044, l'allocazione viene evitata in quanto l'uso di materiale secondario sostituisce l'uso di materie prime (materiali primari).

L'acciaio può essere prodotto attraverso due principali processi: Altoforno (Blast Furnace, BF) e Forno elettrico (Electric Arc Furnace, EAF), che si differenziano principalmente per il tipo di materiale di base impiegato per la produzione dell'acciaio: nel processo BF, l'acciaio è prodotto quasi esclusivamente da materie prime; mentre nel processo EAF, la produzione dell'acciaio avviene principalmente attraverso gli scarti del materiale.

Noti i processi per la produzione dell'acciaio e assunto che i dati della LCI per la produzione di acciaio attraverso il processo BF (si suppone di aver usato il 100% delle materie prime) e attraverso il processo EAF (si suppone di aver usato il 100% di materie secondarie) sono pari rispettivamente a X_{pr} e X_{re} , l'espressione (3.1) fornisce i dati della LCI associati agli scarti:

$$LCI_{scrap} = Y(X_{pr} - X_{re})$$

Eq. (3.1)

in cui, Y è il rendimento del materiale, ovvero l'efficienza del processo secondario che converte gli scarti in acciaio. Secondo la Worldsteel Association (LCI, 2002), occorrono circa 1.05 kg di scarti per produrre 1 kg di acciaio secondario.

Se si considera il processo di produzione dell'acciaio attraverso l'altoforno, ipotizzando come materiale in ingresso il 100% di materia prima e un tasso di recupero RR (Recovery Rate) (frazione di acciaio recuperato dagli scarti su tutto il ciclo di vita di un prodotto in acciaio), si verifica che, nella fase di fine vita, lo scarto netto ottenuto risulta pari al tasso di recupero.

Pertanto, la fase di inventario (LCI) di 1 kg di acciaio, incluso il fine vita, è pari alla LCI per la produzione primaria con un'entrata (credito) pari agli scarti prodotti, come indicato nell'espressione (3.2)

$$LCI = X_{pr} - RR[Y(X_{pr} - X_{re})]$$

Eq. (3.2)

Se, invece, si considera il processo di produzione tramite forno elettrico, assunta la duplice ipotesi che la produzione di nuovo acciaio mediante EAF richiede l'impiego di 1

kg di acciaio secondario e che, a fine vita, una percentuale di acciaio (RR) viene recuperata attraverso il riciclo, gli scarti netti consumati risultano pari a $(1/Y - RR)$.

In tal caso, la LCI di 1 kg di acciaio, incluso il fine vita, è pari alla LCI per la produzione secondaria con un'uscita (debito) dovuta gli scarti utilizzati, come indicato nell'espressione seguente:

(3.3)

$$LCI = X_{re} + (1/Y - RR) \left[Y (X_{pr} - X_{re}) \right]$$

Eq. (3.3)

Riordinando l'espressione (3.3) si arriva alla relazione (3.2), dalla quale si evince che l'analisi di inventario (LCI) del sistema non dipende dall'origine del materiale, ma dalla percentuale di riciclo dell'acciaio e dal rendimento associato al relativo processo di riciclo. Ne consegue che l'espressione (3.3) permette l'allocazione dello scarto di acciaio, indipendentemente dal suo processo di produzione.

Si ricorda che le precedenti espressioni sono state ricavate ipotizzando il 100% della produzione primaria o il 100% della produzione secondaria. In realtà, i prodotti in acciaio realizzati mediante il processo in altoforno potrebbero includere anche il consumo di scarti, così come i prodotti realizzati attraverso l'uso del forno elettrico potrebbero includere anche una piccola percentuale di materie prime. In questo caso, il debito o il credito espresso dalla relazione (3.1) può essere riscritto come riportato nella seguente espressione:

$$LCI_{scrap} = (RR - S) \times Y (X_{pr} - X_{re})$$

Eq. (3.4)

in cui, $(RR - S)$ rappresenta lo scarto netto durante il fine vita. Considerando che i dati della LCI di un prodotto finito di acciaio siano pari a X' , allora la LCI del prodotto, incluso il riciclo a fine vita, è data dalla seguente relazione:

$$LCI = X' - \left[(RR - S) \times Y (X_{pr} - X_{re}) \right]$$

Eq. (3.5)

L'espressione (3.5) è adottata nelle metodologie LCA presentate nel prossimo capitolo, al fine di definire i dati LCI per i prodotti in acciaio, incluso il riciclo a fine vita.

3.2.3 Caratterizzazione dei macro-componenti

I macro-componenti sono stati definiti per diversi componenti edilizi, secondo lo schema di classificazione dello standard UniFormat (2010), in cui si individuano tre categorie principali: (A) Sottostruttura, (B) Chiusure e (C) Partizioni, a loro volta suddivise in ulteriori sottocategorie (Tabella 3.3)

Per ogni componente edilizio (Tabella 3.3) i macro-componenti corrispondenti hanno la stessa funzione e le stesse proprietà.

L'unità funzionale di ogni macro-componente è di 1 m² di un componente edilizio con le stesse caratteristiche, per una vita utile pari a 50 anni.

Questo approccio è stato sviluppato per la valutazione degli edifici in fase di progettazione preliminare (Gervásio et al., 2014), perciò per sopperire alla mancanza di informazioni di dettaglio sulla struttura portante dell'edificio (per esempio una struttura in acciaio con profili laminati a caldo o con profili sottili in acciaio oppure una struttura in cemento armato) questa viene 'assegnata' nell'ambito dei macro-componenti facendo riferimento alle sottocategorie "Struttura portante del solaio di piano" (B1010.10) o "Struttura portante della copertura" (B1020.10), in termini di m².

Tabella 3.3: Classificazione dei componenti edilizi (UniFormat, 2010)

(A) Struttura	(A40) Solaio di fondazione	(A4010) Solaio di fondazione standard		
(B) Chiusure	(B10) Sovrastruttura	(B1010) Solaio di piano	(B1010.10) Struttura portante del solaio (B1010.20) Pavimenti, solette e rivestimenti	
		(B1020) Copertura	(B1020.10) Struttura portante della copertura (B1020.20) Manto di copertura, solette e schermature	
			(B2010) Pareti perimetrali	(B2010.10) Rivestimento della parete esterna (B2010.20) Realizzazione della parete esterna
		(B2020) Infissi esterni (B2050) Porte esterne		
	(B30) Chiusura orizzontale esterna		(B3010) Copertura (B3060) Aperture orizzontali	
		(C) Partizioni	(C10) Partizione interne	(C1010) Partizione interna verticale e orizzontale orizzontale
	(C20) Finiture interne		(C2010) Finitura della parete (C2030) Pavimento (C2050) Finitura del soffitto	

Le informazioni relative ad ogni macro-componente sono illustrate nell'esempio riportato in Tabella 3.4.

In particolare vengono indicate non solo le caratteristiche dei diversi materiali che costituiscono la stratigrafia del macro-componente, ma anche i valori della trasmittanza termica (U) (tenendo conto dei ponti termici, se presenti) e dell'inerzia termica (κ_m), al fine di consentire la quantificazione del fabbisogno energetico dell'edificio in fase d'uso.

I macro-componenti sono, inoltre, catalogati in un database, riportato nell'Appendice 1 di questo documento.

3.2.4 Esempio di assemblaggio attraverso macro-componenti

In alcuni casi, è necessario considerare simultaneamente diversi macro-componenti, affinché un componente edilizio possa svolgere la propria funzione. Di seguito si riporta un esempio illustrativo relativo ad un solaio di un edificio residenziale.

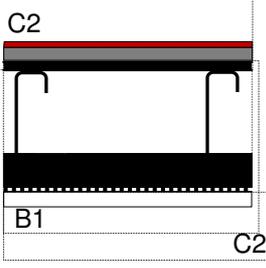
3.2.4.1 Assemblaggio dei macrocomponenti

Si suppone che il solaio sia stato assemblato considerando i seguenti macro-componenti (Tabella 3.4):

- (i) pavimento (C2030),
- (ii) struttura portante del solaio di piano (B1010.10),
- (iii) finitura del soffitto (C2050).

In questo caso, il valore della trasmittanza termica (U) non è stato considerato poiché il macro-componente corrisponde ad un solaio interno, quindi non influisce sul calcolo del fabbisogno energetico.

Tabella 3.4: Macro-componenti per l'assemblaggio di un solaio

Macro-componenti assemblati	Macro-componente	Materiale	Spessore (mm)/ Densità (kg/m ²)	U (W/m ² .K)	κ _m (J/m ² .K)
	C2030 Pavimento	Piastrelle di ceramica	31 kg/m ²	-	61062
		Massetto in calcestruzzo	13 mm		
	B1010.10 Struttura portante del solaio	OSB	18 mm		
		Intercapedine d'aria	160 mm		
		Pannello in pannello in lana di roccia	40 mm		
		Profili in acciaio leggero	14 kg/m ²		
		Cartongesso	15 mm		
	C2050 Finitura del soffitto	Impiancatura	0.125 kg/m ²		

3.2.4.2 Unità funzionale e vita utile dei materiali

L'unità funzionale del componente edilizio è un solaio interno (1 m²) di un edificio residenziale con una vita utile di 50 anni. I macro-componenti selezionati devono soddisfare la stessa unità funzionale del componente edilizio; pertanto, è necessario considerare la vita utile dei singoli materiali, come indicato in Tabella 3.5.

Tabella 3.5: Vita utile dei materiali

Macro-componenti	Materiali	Unità di misura	Vita utile stimata [anni]
Pavimento	Piastrelle in ceramica	m ²	25
	Massetto in calcestruzzo	m ²	50
Struttura portante del solaio	Profili in acciaio leggero	kg/m ²	50
Pavimento	Pannello in lana di roccia	m ²	50
	Pannello OSB	m ²	50
	Pannello in cartongesso	m ²	50
Finitura del soffitto	Pittura	m ²	10

Osservando i dati riportati in tabella, si deduce che alcuni materiali dovranno essere sostituiti o adeguati rispetto ad un predefinito scenario, in modo da soddisfare i requisiti dell'unità funzionale dell'intero solaio.

3.2.4.3 *Scenari e ipotesi*

Al fine di valutare in maniera coerente i risultati delle analisi ambientali, è necessario definire scenari sulla base delle ipotesi iniziali. In particolare, l'unità funzionale fa riferimento ad una vita utile di 50 anni e quindi ogni materiale presente in ogni singolo macro-componente deve soddisfare tale requisito. Tuttavia alcuni materiali hanno una vita utile inferiore a 50 anni (Tabella 3.5), quindi è opportuno ipotizzare diversi scenari per la fase di esercizio per essere conformi alla vita utile richiesta. Analogamente per la fase di fine vita, per ogni materiale sarà considerato un diverso scenario per la modalità di smaltimento, legato alle caratteristiche intrinseche dello stesso. Tutti gli scenari considerati seguono le regole definite negli standard EN 15643-2 e EN 15978.

3.2.4.3.1 *Scenari per il trasporto dei materiali (Moduli A4 e C2)*

Gli scenari relativi al trasporto dei materiali da costruzione riguardano le ipotesi effettuate per definire le distanze tra lo stabilimento di produzione e il cantiere (modulo A4) e quelle tra il luogo della demolizione e il relativo impianto per il riciclo/smaltimento (modulo C2). In particolare, nell'esempio in esame, si ipotizza che le distanze da coprire, utilizzando un camion con un carico utile di 22 tonnellate, siano pari a 20 km. Tuttavia, il progettista potrà specificare altre distanze, facendo un'analisi di sensibilità riguardo al trasporto di materiali diversi.

3.2.4.3.2 *Scenari per la fase d'uso (Moduli B1:B7)*

Gli scenari definiti per la fase d'uso sono volti a garantire una vita utile di 50 anni. In particolare gli scenari previsti per i differenti materiali dei macro-componenti, sono:

- sostituzione delle piastrelle di ceramica ogni 25 anni;
- tinteggiatura del soffitto ogni 10 anni.

3.2.4.3.3 *Scenari per la fase di fine vita (Moduli C1:C4) e riciclo (Modulo D)*

Gli scenari di fine vita sono definiti in base alle caratteristiche intrinseche dei materiali (si veda la Tabella 3.6).

In particolare, si ipotizza:

- l'incenerimento del pannello OSB (per l'80%) in una centrale a biomasse con un conseguente recupero energetico;
- il riciclo del 90% di acciaio. In tal caso i guadagni sono dovuti agli scarti netti dei processi di fine vita;
- il riciclo dell'80% del pannello in lana di roccia;
- lo smaltimento in discarica per i materiali inerti per i restanti elementi.

Tuttavia, a causa della mancanza di dati relativi al processo di riciclo, si conoscono i soli guadagni legati al trattamento dei rifiuti in discarica.

Tabella 3.6: Scenari di fine vita dei materiali

Materiale	Scenario Discarica /Riciclo	Guadagni
Piastrelle in ceramica	Discarica (100%)	-
Massetto in calcestruzzo	Discarica (100%)	-
Pannello in cartongesso	Discarica (100%)	-
Pannello in lana di roccia	Riciclo (80%) + Discarica (20%)	-
Pannello OSB	Incenerimento (80%) + Discarica (20%)	Energia di recupero
Profili in acciaio leggero	Riciclo (90%) + Discarica (10%)	Scarti netti

3.2.4.4 *Analisi ambientale*

I risultati dell'analisi ambientale per i macro-componenti assemblati (Tabella 3.4), sono riportati in Tabella 3.7.

Tabella 3.7: Analisi ambientale dei macro-componenti (in m²)

Categorie d'impatto	A1-A3	A4	B4	C2	C4	D	TOTALI
ADP elem. [kg Sb-Eq.]	1.86E-03	6.59E-09	1.83E-03	5.76E-09	5.93E-07	-1.96E-04	3.49E-03
ADP fossile [MJ]	1.31E+03	2.45E+00	8.12E+02	2.14E+00	2.31E+01	-3.35E+02	1.82E+03
AP [kg SO ₂ Eq.]	2.47E-01	7.91E-04	9.14E-02	6.85E-04	1.01E-02	-4.45E-02	3.05E-01
EP [kg PO ₄ Eq.]	2.61E-02	1.82E-04	1.40E-02	1.57E-04	1.54E-03	-1.01E-03	4.09E-02
GWP [kg CO ₂ Eq.]	8.38E+01	1.77E-01	6.48E+01	1.54E-01	6.80E+00	-1.45E+01	1.41E+02
ODP [kg R11 Eq.]	2.80E-06	3.09E-12	2.04E-06	2.70E-12	1.27E-09	1.76E-07	5.01E-06
POCP [kg Etilene Eq.]	3.41E-02	-2.58E-04	1.43E-02	-2.23E-04	2.62E-03	-1.07E-02	3.98E-02

Se si considera il contributo di ciascun modulo (Fig. 3.3), si evince che i Moduli A1-A3 predominano su tutte le categorie di impatto (circa per il 50%), il Modulo B4 contribuisce nella misura del 10%-20%, il Modulo D influisce in maniera considerevole (per circa il 10%) sulla maggior parte delle categorie. Di minore rilevanza è il contributo del modulo C4 (in alcuni casi quasi il 5%); a decrescere i restanti moduli.

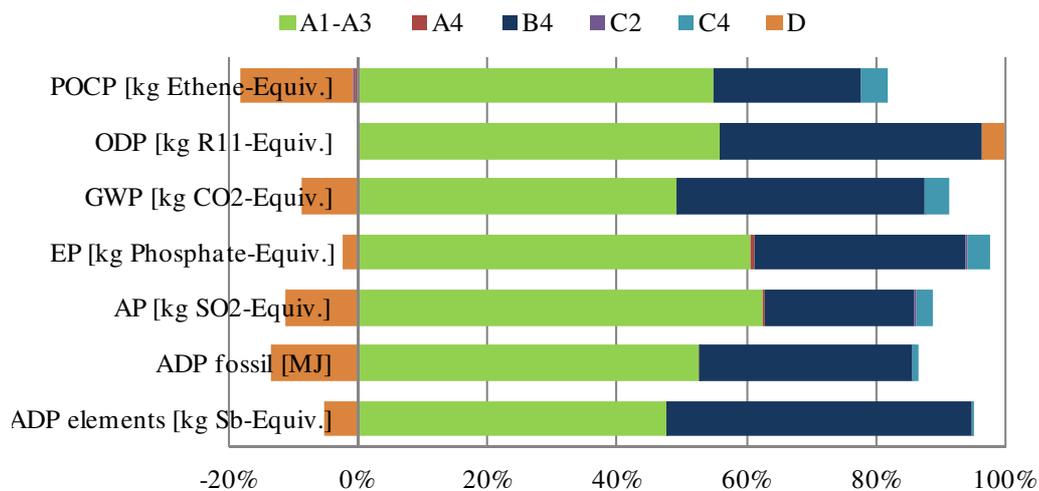


Fig. 3.3: Analisi degli impatti ambientali per ciascun macro-componente (in m²)

Tutti i macro-componenti sono analizzati in modo analogo. Come detto in precedenza, l'utilizzo di macro-componenti consente di effettuare valutazioni delle prestazioni nel ciclo di vita a livello del componente dell'edificio o a livello dell'edificio nel suo insieme.

3.3 Algoritmo per quantificare l'energia (fase d'uso)

3.3.1 Introduzione

La norma EN 15978 (2011), come descritto nei precedenti paragrafi, permette di valutare tutti i potenziali impatti ambientali dell'edificio in relazione ad ogni modulo in cui è stato schematizzato l'intero ciclo di vita (*produzione dei materiali, uso, fine vita e riuso, recupero e potenziale riciclo*). In particolare il Modulo B6 è relativo all'impiego di energia nella fase d'uso, quale ad esempio i consumi energetici di un edificio in esercizio. I confini del modulo B6 devono essere conformi alla certificazione EPBD in accordo alla norma EN 15603 (2008) e includono l'energia utilizzata per il riscaldamento, il raffrescamento, la produzione di acqua calda sanitaria, la ventilazione, l'illuminazione e gli impianti ausiliari.

Il metodo semplificato proposto tiene conto delle caratteristiche dell'edificio e degli impianti installati e permette di calcolare il fabbisogno energetico necessario per il riscaldamento, il raffrescamento e la fornitura di acqua calda sanitaria (ACS) durante la fase d'uso dell'edificio, escludendo dal calcolo la ventilazione meccanica e l'illuminazione, poiché queste ultime due componenti non sono direttamente connesse al sistema costruttivo adottato per l'edificio.

Il calcolo dei consumi energetici per il riscaldamento e il raffrescamento segue il metodo mensile quasi stazionario, in accordo alla norma ISO 13790 (2008) che consente il calcolo del bilancio termico su un tempo sufficientemente lungo (tipicamente, un mese o un'intera stagione), tenendo conto degli effetti termici dinamici attraverso i fattori di

utilizzazione degli apporti e/o delle dispersioni.).Il fabbisogno energetico per la produzione di ACS, invece, viene calcolata in accordo alla EN 15316-3-1 (2007).

3.3.2 Ubicazione e clima dell'edificio

Il calcolo del fabbisogno energetico di un edificio durante la fase d'uso richiede la conoscenza delle variabili che maggiormente ne influenzano il comportamento termico e l'efficienza energetica.

In particolare, i parametri da considerare possono essere raggruppati in quattro categorie (Fig. 3.4): *clima*, *involucro*, *impianti* e *fattore umano* e la maggior parte di essi sono nclusi nell'algoritmo per la quantificazione dell'energia descritto nei paragrafi seguenti.

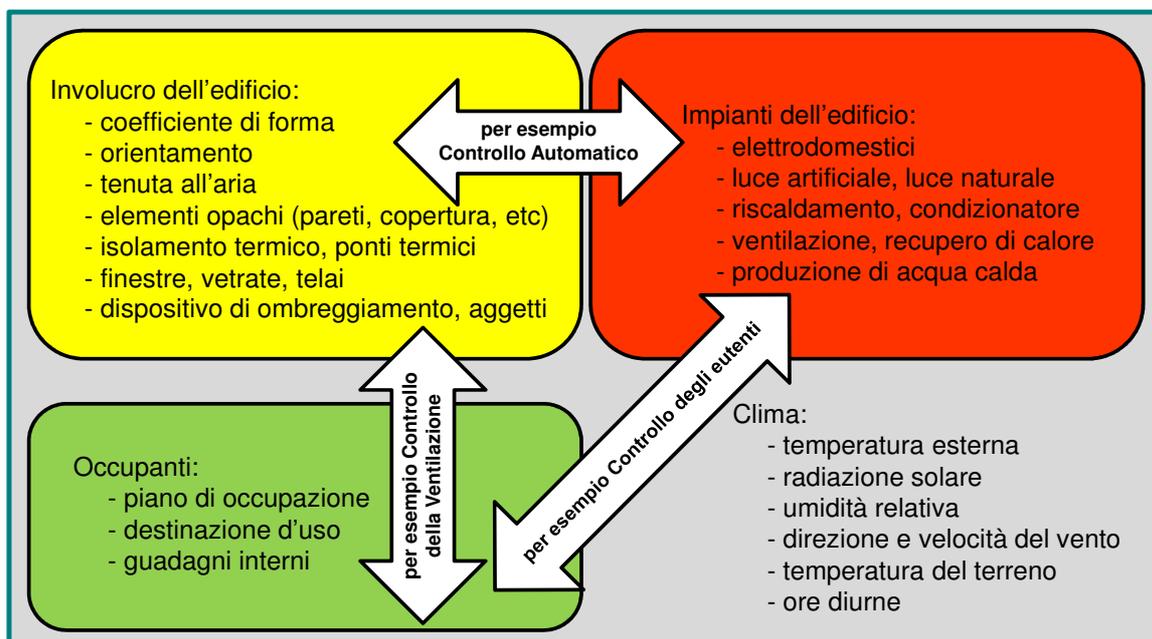


Fig. 3.4: Principali fattori che influenzano il consumo di energia degli edifici (Santos et al., 2012)

L'ubicazione dell'edificio, in termini di condizioni climatiche, rappresenta una delle caratteristiche principali da considerare per il calcolo delle prestazioni termiche (Santos et al., (Santos et al., 2011, 2012).

In particolare, si richiede la definizione di due parametri climatici fondamentali:

- i) la temperatura dell'aria;
- ii) la radiazione solare incidente su sulla superficie considerando un determinato orientamento.

A titolo esemplificativo il grafico in Fig. 3.5 mostra i valori medi mensili di questi due parametri per la città di Timisoara (Romania).

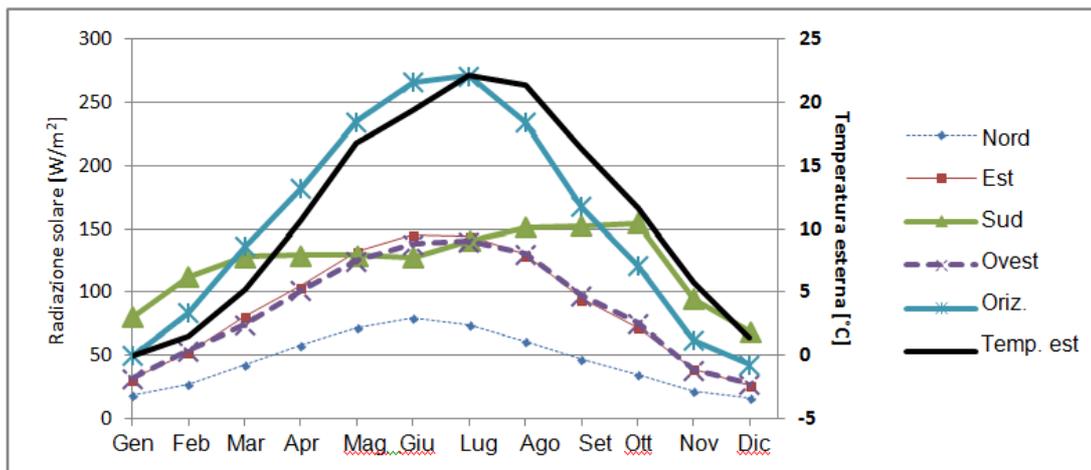


Fig. 3.5: Valori medi della temperatura esterna e della radiazione solare incidente: Timisoara (RO)

La metodologia per il calcolo del fabbisogno energetico è attualmente calibrata su cinque regioni climatiche: (i) Csa; (ii) Csb; (iii) Cfb; (iv) Dfb; (v) Dfc, individuate secondo il noto sistema di classificazione climatica Köppen-Geiger (Kottek et al., 2006).

La mappa riportata in

Fig. 3.6 mostra la classificazione Köppen-Geiger, relativa all'Europa in cui è chiaramente evidente che il clima di ogni regione è notevolmente influenzato da tre caratteristiche geografiche fondamentali: latitudine, altitudine e vicinanza alla costa.

In particolare, le regioni con latitudini più basse, al di sotto del 45°N (Europa meridionale, per esempio l'area mediterranea), rientrano nelle categorie climatiche Csa e Csb, caratterizzate dal "clima temperato, C" con "estati secche, s" e "estati calde, a" o "estati miti, b".

Le regioni con latitudini comprese tra 45°N e 55°N, ovvero i Paesi dell'Europa centro-occidentale, presentano un clima classificato come Cfb, quindi "clima temperato, C" e "molto umido, f" con "estati calde, b". Nei Paesi dell'Europa centro-orientale (lontani dalla costa atlantica) il clima è di tipo Dfb, ovvero "clima freddo, D" e "molto umido, f" e con "estati calde, b".

Nelle regioni con latitudini ancora più elevate, al di sopra dei 55° N, i Paesi del Nord Europa, il clima è di tipo Dfc, caratterizzato da o "clima freddo, D" e "molto umido, f" con "estati fresche, c".

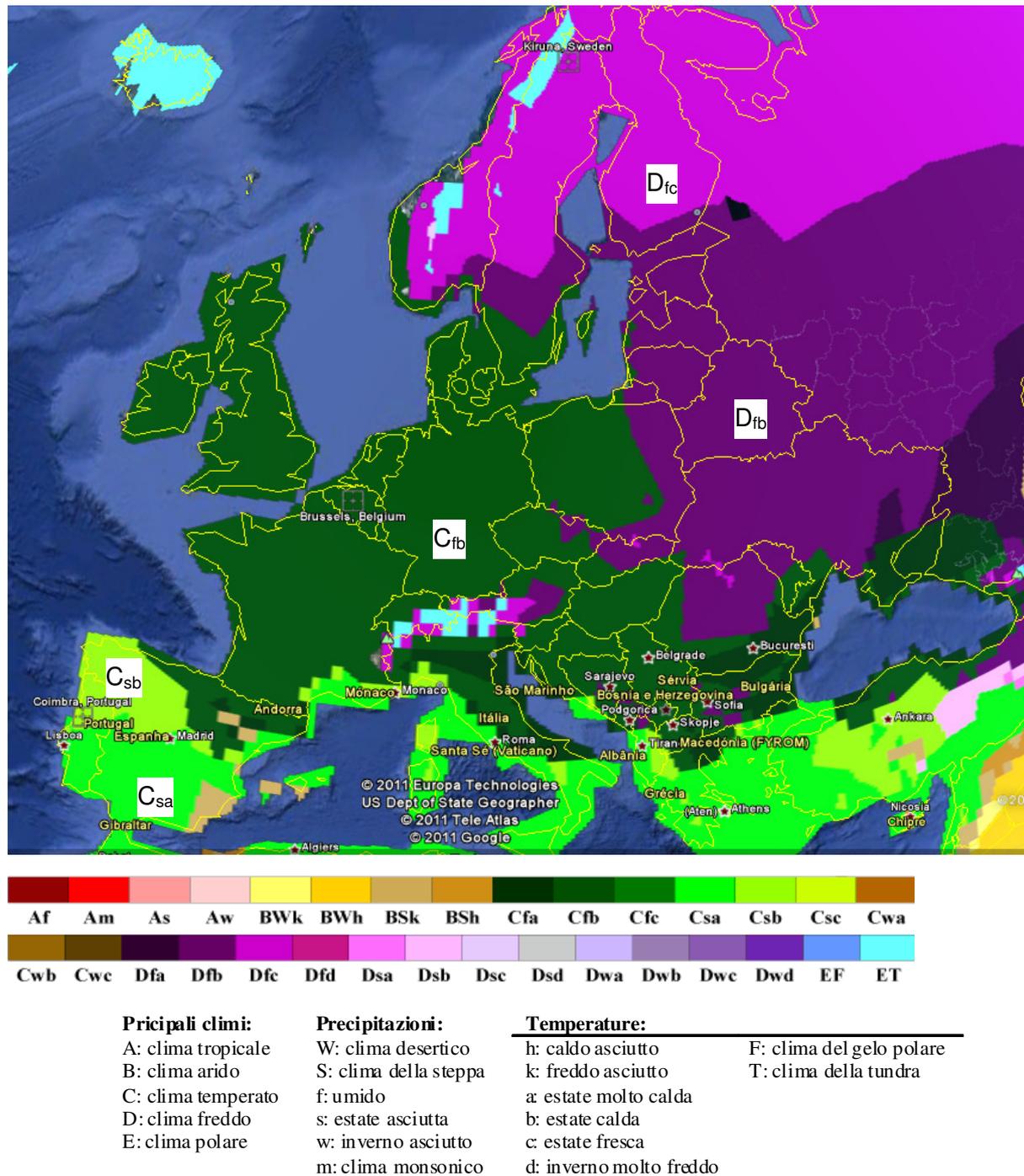


Fig. 3.6: Mappa climatologia europea secondo la classificazione di Köppen-Geiger (Kottek et al., 2006; Google Earth, 2014).

Sulla base di questa classificazione, sarà realizzato un database con i dati climatici delle varie località europee; tali informazioni, ottenute dal database climatico del software per la simulazione energetica degli edifici “EnergyPlus” (EERE-USDoE, 2014), sono attualmente disponibili solo per 48 città, indicate in Tabella 3.8. Progetti di ricerca complementari permetteranno di completare il quadro fornendo i dati per le città al momento escluse.

Tabella 3.8: Dati sul clima di alcune città

Città	Nazione	Regione Climatica	Latitudine
Amsterdam	Paesi Bassi	Cfb	52
Ankara	Turchia	Csb	39
Arhanglesk	Russia	Dfc	64
Atene	Grecia	Csa	37
Barcellona	Spagna	Csa	41
Berlino	Germania	Cfb	52
Bilbao	Spagna	Cfb	43
Bratislava	Slovenia	Cfb	48
Brussels	Belgio	Cfb	50
Bucharest	Romania	Cfa	44
Coimbra	Portogallo	Csb	40
Genova	Italia	Csb	44
Graz	Austria	Dfb	47
Amburgo	Germania	Cfb	53
Helsinki	Finlandia	Dfb	60
Istambul	Turchia	Csa	40
Kiev	Ucraina	Dfb	50
Kiruna	Svezia	Dfc	67
La Coruña	Spagna	Csb	43
Lisbona	Portogallo	Csa	38
Lubiana	Slovenia	Cfb	46
Londra	Inghilterra	Cfb	50
Madrid	Spagna	Csa	40
Marsiglia	Francia	Csa	43
Milano	Italia	Cfb	45
Minsk	Bielorussia	Dfb	53
Montpellier	Francia	Csa	43
Mosca	Russia	Dfb	55
Monaco	Germania	Cfb	48
Nantes	Francia	Cfb	47
Nice	Francia	Csb	43
Oslo	Norvegia	Dfb	59
Ostersund	Svezia	Dfc	63
Parigi	Francia	Cfb	48
Porto	Portogallo	Csb	41
Praga	Repubblica Ceca	Cfb	50
Roma	Italia	Csa	41
Salamanca	Spagna	Csb	40
Sanremo	Italia	Csb	43
Siviglia	Spagna	Csa	37
Stoccolma	Svezia	Dfb	59
Tampere	Finlandia	Dfc	61
Salonicco	Grecia	Cfa	40
Timisoara	Romania	Cfb	45
Vienna	Austria	Dfb	48

Città	Nazione	Regione Climatica	Latitudine
Vigo	Spagna	Csb	42
Varsavia	Polonia	Dfb	52
Zurigo	Svizzera	Cfb	47

3.3.3 Metodo per il calcolo del fabbisogno energetico

Il metodo adottato consente di calcolare il fabbisogno energetico su base mensile per il riscaldamento e il raffrescamento e per la produzione di acqua calda sanitaria (ACS). Il contributo di ognuno di questi termini nei calcoli termici viene esplicitato sulla base di norme specifiche, come mostrato in Figura 3.7.

In particolare, in relazione al raffrescamento e riscaldamento, la normativa principale cui fare riferimento è lo standard ISO 13790 (2008).

Nel calcolo del consumo energetico di un edificio, soprattutto nel caso di residenze, è opportuno stimare anche il contributo per la produzione di ACS, in accordo alla norma EN 15316-3-1 (2007).

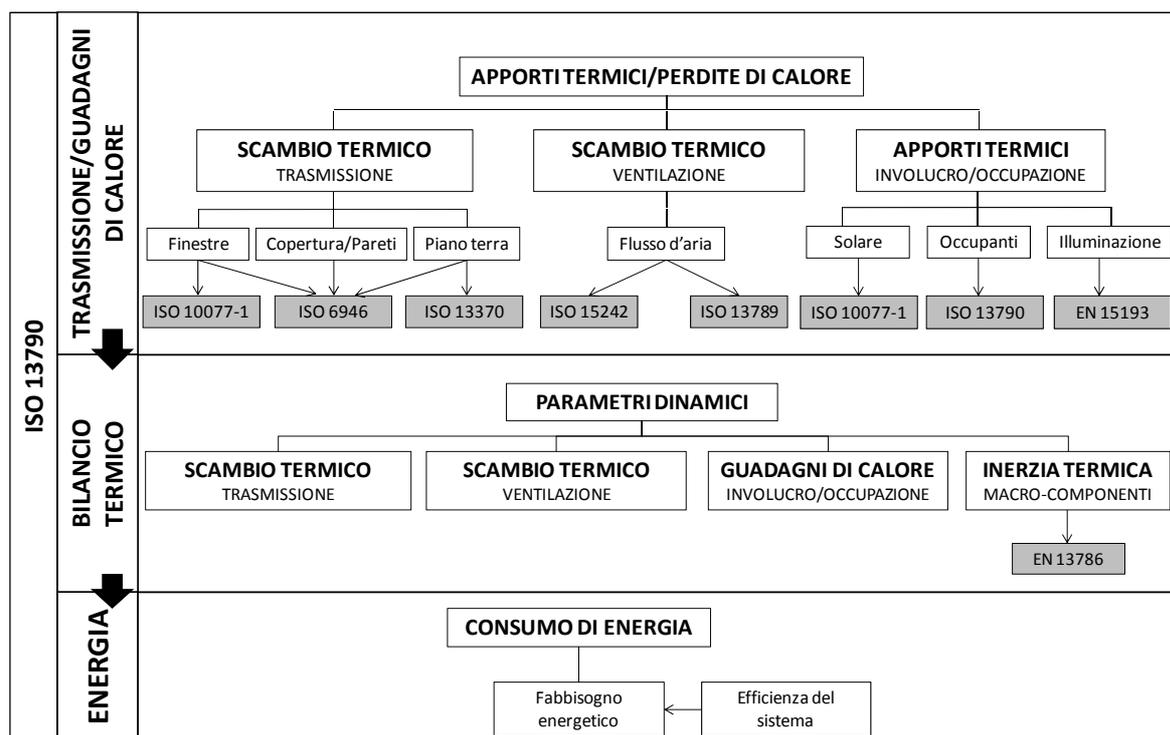


Fig. 3.7: Diagramma di flusso dell'algoritmo e dei riferimenti normativi degli ambienti climatizzati

La procedura e la struttura dell'algoritmo per il calcolo del fabbisogno energetico sono descritte nello schema riportato in Figura 3.8.

In tale diagramma, i sotto-moduli 1 e 2 relativi, rispettivamente, alla trasmittanza termica (U) e alla capacità termica degli elementi dell'involucro, sono stati precedentemente

calcolati per i macro-componenti scelti dall'utente. Il sotto-modulo 3 si riferisce allo scambio termico con il terreno; i sotto-moduli 4, 5 e 6 sono rivolti al calcolo degli effetti dei dispositivi di oscuramento e dell'ombra in funzione della forma della pianta, anche se nella versione attuale di AMECO si considerano soltanto edifici a pianta rettangolare.

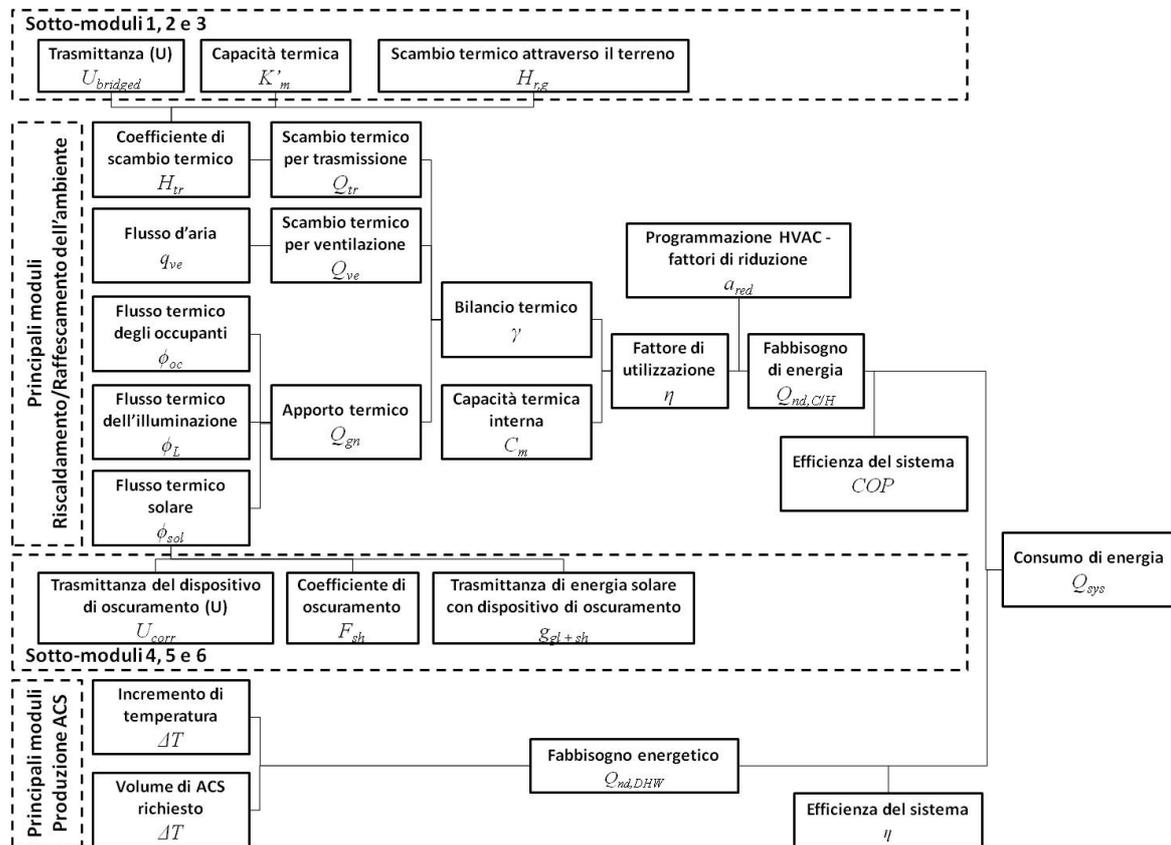


Fig. 3.8: Diagramma di flusso del calcolo del consumo di energia di un edificio

3.3.3.1 Fabbisogno energetico per il riscaldamento e il raffrescamento ambienteambienti

Le principali equazioni, definite nella ISO 13790 (2008) per calcolare il fabbisogno energetico mensile (m), ipotizzando un sistema continuo ($cont$), sono riportate di seguito:

$$Q_{H,nd,cont,m} = (Q_{H,tr,m} + Q_{H,ve,m}) - \eta_{H,gn,m} \cdot Q_{H,gn,m}$$

Eq. (3.6)

$$Q_{C,nd,cont,m} = Q_{C,gn,m} - \eta_{C,ls,m} \cdot (Q_{C,tr,m} + Q_{C,ve,m})$$

Eq. (3.7)

In cui,

$Q_{H,nd}$, è il fabbisogno energetico per il riscaldamento (kWh);

- $Q_{C,nd}$, è il fabbisogno energetico per il raffrescamento (kWh);
 Q_{tr} , è lo scambio termico totale per trasmissione (kWh);
 Q_{ve} , è lo scambio termico totale per ventilazione (kWh);
 $\eta_{H,gn}$, è il fattore di utilizzazione degli apporti termici per il riscaldamento (-);
 $\eta_{C,Is}$, è il fattore di utilizzazione delle dispersioni per il raffrescamento (-).

La metodologia utilizzata per la stima di tutti i termini inclusi nel calcolo del fabbisogno energetico sarà presentata in dettaglio nei paragrafi successivi.

3.3.3.1.1 Scambio termico per trasmissione

Il bilancio termico di un edificio include tutti i tipi di scambio termico per trasmissione attraverso i seguenti componenti:

- (i) pareti;
- (ii) copertura;
- (iii) piani fuori terra (se presenti);
- (iv) finestre (superficie vetrata + telai);
- (v) piano terra

Lo scambio termico per trasmissione, riferito ai casi delle pareti e delle finestre, avviene mediante il meccanismo di conduzione, senza considerare gli effetti della massa; pertanto, la dispersione è proporzionale alla differenza di temperatura tra gli ambienti interni ed esterni e al coefficiente di scambio termico dell'elemento, come definito nelle equazioni Eq. (3.8), Eq. (3.9) e Eq. (3.10).

Lo scambio termico per trasmissione verso il terreno include, in maniera indiretta, gli effetti dell'inerzia del terreno, perciò la stima del coefficiente di scambio termico segue un metodo diverso rispetto all'approccio utilizzato per gli altri componenti, Eq. (3.11).

$$Q_{tr} = H_{tr,adj}(\theta_{int,sec} - \theta_e) \cdot t$$

Eq. (3.8)

$$H_{tr,adj} = H_{D,W} + H_{D,R} + H_{D,EF} + H_{D,Gl} + H_{GF}$$

Eq. (3.9)

$$H_D = \sum_l A_i \cdot U_i$$

Eq. (3.10)

$$H_{GF} = b_{tr,g} \cdot A_i \cdot U_{GF}$$

Eq. (3.11)

In cui,

Q_{tr} , è lo scambio termico totale per trasmissione (kWh);

$H_{tr,adj}$, è il coefficiente di scambio termico globale (W/K);

$\theta_{int,sec,H}$ e $\theta_{int,sec,C}$, sono le temperature interne di regolazione degli ambienti dell'edificio, rispettivamente, per il riscaldamento e il raffrescamento (°C);

t , è la durata del passo di calcolo fornita dalla ISO 13790 (Ms);

H_D , è il coefficiente di scambio termico per trasmissione verso l'ambiente esterno (W/K), attraverso: le pareti $H_{D,W}$; la copertura $H_{D,R}$; piani fuori terra $H_{D,EF}$; le superfici vetrate $H_{D,Gl}$;

H_{GF} , è il coefficiente di scambio termico per trasmissione attraverso il terreno (W/K);

$b_{tr,g}$, è il fattore di correzione dello scambio termico mensile per trasmissione attraverso il terreno (W/K);

A_i , è la superficie dell'elemento i -esimo (m^2);

U_i , è la trasmittanza termica dell'elemento i -esimo (W/m^2K);

U_{GF} , è la trasmittanza termica del sistema solaio + terreno (W/m^2K).

I parametri relativi alla variabile 'tempo' usati nei calcoli, sono ricavati in accordo alla norma ISO13790 (Tabella 3.9).

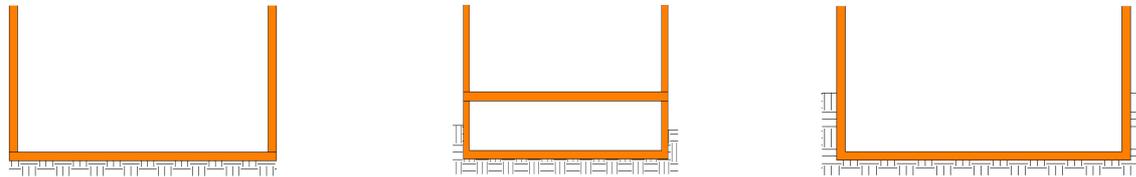
Tabella 3.9: Valori relativi relative al tempo

	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Durata del mese, t (Ms)	2.6784	2.4192	2.6784	2.5920	2.6784	2.5920	2.6784	2.6784	2.5920	2.6784	2.5920	2.6784
Giorni del Mese (giorni)	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Num giorni di lavoro (giorni)	23	20	21	22	23	20	23	22	21	23	21	22

Tutti i coefficienti di trasmittanza termica, ad eccezione di quelli relativi allo scambio termico con il terreno, sono calcolati in accordo alla norma EN ISO 6946:2007.

Scambio termico con il terreno

Il calcolo dello scambio termico con il terreno varia a seconda della tipologia di solaio considerato (Fig. 3.9), in accordo alla norma ISO 13370: 2007.



a) Solaio direttamente sul terreno b) Solaio di base sospeso c) Seminterrato (riscaldato o non riscaldato)

Fig. 3.9: Tipo di solaio controterra

La quantità di calore trasferito al (o dal) terreno è calcolata in funzione del coefficiente di trasmissione termica, al fine di considerare l'isolamento aggiuntivo fornito dal terreno. Inoltre, il coefficiente di scambio termico è modificato anche per includere il flusso termico mensile, calcolato prendendo in considerazione l'effetto dell'inerzia termica del terreno. Le proprietà termiche utilizzate per il terreno sono riportate in Tabella 3.10.

Tabella 3.10: Proprietà termiche del terreno (ISO 13370:2007)

	Conduttività termica λ [W/(m·K)]	Capacità termica per unità di volume ρ_c [MJ/(m ³ ·K)]
Argilla o limo	1.5	3.00
Sabbia o ghiaia	2.0	2.00
Roccia omogenea	3.5	2.00
Predefinito	2.0	2.00

Scambio termico attraverso le finestre

L'algoritmo contiene un database con i valori medi delle proprietà ottiche e termiche in relazione a diversi tipi di vetro (EN 15193) come elencato in Tabella 3.11, in cui $g_{gl,n}$ è la trasmittanza di energia solare per la radiazione perpendicolare alla superficie vetrata e U_{Gl} è la trasmittanza termica della finestra.

Tabella 3.11: Valori predefiniti delle proprietà ottiche e termiche delle finestre

Tipo di vetro	$g_{gl,n}$	U_{Gl}
Singolo vetro	0.87	5.8
Doppio vetro	0.78	2.9
Doppio vetro basso-emissivo 1	0.72	1.7
Doppio vetro basso-emissivo 2	0.67	1.4
Doppio vetro basso-emissivo 3	0.65	1.2
Triplo vetro	0.7	2.0
Triplo vetro basso-emissivo 1	0.5	0.8
Triplo vetro basso-emissivo 2	0.5	0.6

Lo scambio termico attraverso le finestre è calcolato in accordo alla relazione Eq. (3.10). Tuttavia, per tenere conto dell'effetto positivo dovuto all'isolamento notturno per la presenza di dispositivi oscuranti, è necessario considerare un coefficiente di trasmittanza termica corretto, $U_{Gl,corr}$ espresso in W/m^2 e calcolato in accordo, all'equazione :

$$U_{Gl,corr} = U_{Gl+shut} \cdot f_{shut} + U_{Gl} \cdot (1 - f_{shut})$$

Eq. (3.12)

In cui,

$U_{Gl+shut}$, è la trasmittanza termica della finestra e dell'oscurante (W/m^2K);

f_{shut} , è la frazione adimensionale della differenza cumulata di temperatura quando viene impiegato l'oscurante;

U_{Gl} , è la trasmittanza termica della finestra senza l'oscurante.

La trasmittanza termica della finestra con il dispositivo oscurante attivato, $U_{Gl+shut}$, è calcolato secondo l'equazione seguente:

$$U_{Gl+shut} = \frac{1}{\frac{1}{U_{Gl}} + R_{sh} + \Delta R}$$

Eq. (3.13)

In cui,

R_{sh} , è la resistenza termica dell'oscurante ($m^2.K/W$);

ΔR , è la resistenza termica addizionale per una specifica permeabilità all'aria dell'oscurante ($m^2.K/W$).

Nell'algoritmo i valori predefiniti per R_{sh} e ΔR sono forniti dalla ISO 10077-1 (2007) e variano in funzione del tipo di materiale dell'oscurante e della loro permeabilità all'aria (Tabella 3.12).

Nell'algoritmo in esame, la frazione adimensionale della differenza cumulata di temperatura derivante dal profilo orario di utilizzo del dispositivo oscurante f_{shut} , è stata considerata uguale alla frazione di tempo notturna (protezione notturna).

Tabella 3.12 – Resistenza termica degli oscuranti per finestre

Tipo di oscurante	R_{sh} [m ² .K/W]	Permeabilità all'aria		
		Alta /Molto alta	Media	Bassa
		ΔR [m ² .K/W]		
Avvolgibile in alluminio per esterni (no isolamento)	0.01	0.00	0.12	0.00
Dispositivo in legno opaco per esterni (no isolamento)	0.10	0.00	0.16	0.00
Avvolgibile in legno per esterni (no isolamento)	0.10	0.00	0.16	0.00
Avvolgibile in plastica per esterni (no isolamento)	0.10	0.00	0.16	0.00
Tende veneziane in legno per esterni	0.01	0.09	0.00	0.00
Tende veneziane in metallo per esterni	0.01	0.09	0.00	0.00
Tenda a rullo opaca per esterni	0.01	0.09	0.00	0.00
Tenda a rullo traslucida per esterni	0.01	0.09	0.00	0.00
Oscurante interno	0.01	0.00	0.00	0.24
Tende opache per interni	0.00	0.00	0.00	0.00
Tende trasparenti per interni	0.00	0.00	0.00	0.00
Dispositivo in legno opachi per interni	0.10	0.00	0.00	0.31
Tapparelle in plastica con riempimento in schiuma	0.15	0.00	0.19	0.00
Oscuranti in legno, spessore da 25mm a 30mm	0.20	0.00	0.22	0.00

3.3.3.1.2 Scambio termico per ventilazione

Una delle tecniche più usate per avere, all'interno di un edificio, un tipo di raffreddamento/ riscaldamento passivo è quella che cerca di sfruttare le condizioni più vantaggiose di ventilazione, al fine di ottimizzare la propria prestazione termica.

In inverno è preferibile ridurre la ventilazione in modo da evitare dispersioni di calore; in estate, invece, può essere vantaggioso aumentare i ricambi d'aria degli ambienti, qualora la temperatura esterna contribuisca a favorire la tecnica passiva. Pertanto, l'algoritmo permette di definire differenti condizioni di flusso d'aria per il riscaldamento e il raffrescamento.

Il metodo che prende in considerazione lo scambio termico per ventilazione è descritto nello standard ISO 13790:2008 (paragrafo 9.3) secondo, le espressioni seguenti:

$$Q_{ve} = H_{ve,adj}(\theta_{int,sec} - \theta_e) \cdot t$$

Eq. (3.14)

$$H_{ve,adj} = \rho_a \cdot c_a \cdot \left(\sum_k b_{ve,k} \cdot q_{ve,k,mn} \right)$$

Eq. (3.15)

$$q_{ve,k,mn} = f_{ve,t,k} \cdot q_{ve,k}$$

Eq. (3.16)

dove,

$\rho_a \cdot c_a$, è la capacità termica dell'aria per unità di volume ($\text{J}/\text{m}^3 \cdot \text{K}$);

$q_{ve,k,mn}$, è la portata volumica mediata sul tempo del flusso d'aria *k-esimo* (m^3/s);

$b_{ve,k}$, è il fattore di correzione della temperatura per il flusso d'aria *k-esimo*.

Se un edificio non è dotato di un sistema di pre-riscaldamento (ad esempio un recuperatore di calore), il fattore di correzione della temperatura, $b_{ve,k}$, è pari ad 1; inel caso contrario è necessario procedere al calcolo di questo parametro attraverso la seguente relazione:

$$b_{ve,k} = (1 - f_{ve,frac,k} \cdot \eta_{hru})$$

Eq. (3.17)

In cui,

$f_{ve,frac,k}$, è la frazione di tempo in cui si verifica il flusso d'aria *k-esimo* che passa attraverso l'unità di recupero di calore;

η_{hru} , è l'efficienza dell'unità di recupero di calore.

3.3.3.1.3 Apporti termici interni

Il calcolo del bilancio termico a livello dell'edificio, tiene conto anche del contributo dovuto al calore generato dagli occupanti e dalle apparecchiature elettriche o dal sistema di illuminazione stimato attraverso il apporto termico interno. L'algoritmo consente di considerare anche questo contributo nel bilancio di energia, utilizzando dati stabiliti dall'utente o valori predefiniti in accordo alla norma ISO 13790: 2008, ottenuti da un programma settimanale di occupazione e dal corrispondente flusso di calore.

In dettaglio gli apporti termici dovuti a sorgenti di calore interne, sono calcolati secondo la formula seguente:

$$Q_{int} = \left(\sum_k \Phi_{int,mn,k} \right) \cdot t + \left(\sum_k (1 - b_{tr,l}) \Phi_{int,mn,u,l} \right) \cdot t$$

Eq. (3.18)

In cui ,

$\Phi_{int,mn,k}$, è il flusso termico, mediato sul tempo, prodotto dalla *k-esima* sorgente di calore interna (W);

$\Phi_{int,mn,u,l}$, è il flusso termico, mediato sul tempo, prodotto dalla *l-esima* sorgente di calore interna nell'ambiente non climatizzato adiacente *u* (W);

$b_{tr,l}$, è il fattore di riduzione per l'ambiente non climatizzato adiacente, avente la sorgente di calore interna *l*-esima;

t , è la durata del mese (Ms).

Nella Tabella 3.13 sono riportati i valori di riferimento per il flusso di calore generato dagli occupanti e dagli elettrodomestici.

Tabella 3.13 – Flussi termici generati dagli occupanti e dagli elettrodomestici in un edificio residenziale (ISO 13790:2008)

Giorni	Ore	Soggiorno più cucina	Altri ambienti climatizzati
		$(\Phi_{int,oc} + \Phi_{int,A})/A_f$ [W/m ²]	(per es. camere da letto) $(\Phi_{int,oc} + \Phi_{int,A})/A_f$ [W/m ²]
Da Lunedì a Venerdì	07:00 to 17:00	8.0	1.0
	17:00 to 23:00	20.0	1.0
	23:00 to 07:00	2.0	6.0
Sabato e Domenica	07:00 to 17:00	8.0	2.0
	17:00 to 23:00	20.0	4.0
	23:00 to 07:00	2.0	6.0

3.3.3.1.4 Apporti termici solari

L'apporto termico solare rappresenta un'altra aliquota energetica da considerare nell'equazione di bilancio termico di un edificio; in particolare, la relazione generale per il calcolo:

$$Q_{sol} = \left(\sum_k \Phi_{sol,mn,k} \right) \cdot t + \left(\sum_k (1 - b_{tr,l}) \Phi_{sol,mn,u,l} \right) \cdot t$$

Eq. (3.19)

dove,

$\Phi_{sol,mn,k}$, è il flusso termico di origine solare, mediato sul tempo, nell'ambiente climatizzato attraverso la k -esima superficie d'involucro (W);

$\Phi_{sol,mn,u,l}$, è il flusso termico l -esimo di origine solare nell'ambiente non climatizzato adiacente u , mediato sul tempo (W);

$b_{tr,l}$, è il fattore di riduzione per l'ambiente non climatizzato adiacente;

t , è la durata del mese (Ms).

Al fine di definire il flusso termico solare, è necessario calcolare l'area di captazione solare effettiva di ciascun componente soggetto alla radiazione solare. I metodi descritti nella norma ISO 13790 (2008) permettono di considerare nel calcolo l'effetto dei dispositivi di ombreggiatura, l'ombra prodotta dall'edificio stesso e altri fenomeni connessi al clima, come verrà esposto in dettaglio nei paragrafi successivi.

Il flusso termico di origine solare attraverso il k -esimo elemento edilizio è dato dalla seguente relazione:

$$\Phi_{sol,mn,k} = F_{sh,ob,k} \cdot A_{sol,k} \cdot I_{sol,k} - F_{r,k} \cdot \Phi_{r,k}$$

Eq. (3.20)

In cui,

$F_{sh,ob,k}$, è il fattore di riduzione per ombreggiatura relativo ad ostacoli esterni per l'area soleggiata efficace della superficie k (-);

$A_{sol,k}$, è l'area di captazione solare effettiva della superficie k -esima (-);

$I_{sol,k}$, è l'irradianza solare media mensile, sulla superficie k -esima (W/m^2);

$F_{r,k}$, è il fattore di forma tra il componente edilizio k -esimo e la volta celeste (-);

$\Phi_{r,k}$, è l'extra flusso termico dovuto alla radiazione infrarossa emessa verso la volta celeste dal componente edilizio k -esimo (W/m^2).

Il fattore di riduzione per ombreggiatura relativo agli schermi esterni, $F_{sh,ob,k}$, è trascurato nella versione di AMECO impiegata per il caso studio; l'area di captazione solare effettiva della superficie degli elementi vetrati è calcolata attraverso la relazione seguente:

$$A_{sol} = F_{sh,gl} \cdot g_{gl} \cdot (1 - F_F) \cdot A_{w,p}$$

Eq. (3.21)

dove,

$F_{sh,gl}$, è il fattore di riduzione per ombreggiatura relativo all'utilizzo di schermature mobili (-);

g_{gl} , è la trasmittanza di energia solare della parte trasparente del componente (-);

F_F , è la frazione di area relativa al telaio (-);

$A_{w,p}$, è l'area proiettata totale del componente vetrato, ovvero l'area complessiva del vano finestra (m^2).

Nel caso in cui le finestre presentino dispositivi di ombreggiamento, al fine di considerare l'effetto positivo dovuto all'isolamento solare, ad esempio durante la stagione fresca, è necessario calcolare il fattore di riduzione di ombreggiamento attraverso la relazione seguente:

$$F_{sh,gl} = \frac{(1 - f_{sh,with}) \cdot g_{gl} + f_{sh,with} \cdot g_{gl+sh}}{g_{gl}}$$

Eq. (3.22)

In cui,

g_{gl+sh} , è la trasmittanza di energia solare totale della finestra con schermatura mobile;

$f_{sh,with}$, frazione di tempo in cui è utilizzata la schermatura solare.

I valori adottati per la trasmittanza di energia solare delle finestre in cui è attivata la schermatura, g_{gl+sh} , sono riportati in Tabella 3.14 e sono adottati da RCCTE (2006).

Tabella 3.14: Trasmittanza di energia solare della finestra con schermatura, g_{gl+sh}

Tipo di schermatura	Colore della schermatura		
	Chiaro	Medio	Scuro
Dispositivo in legno opaco per esterni (no isolamento)	0.03	0.05	0.06
Avvolgibile in legno per esterni (no isolamento)	0.04	0.05	0.07
Avvolgibile in alluminio per esterni (no isolamento)	0.04	0.07	0.09
Avvolgibile in plastica per esterni (no isolamento)	0.04	0.07	0.09
Tende veneziane in legno per esterni	0.08	0.08	0.08
Tende veneziane in metallo per esterni	0.09	0.09	0.09
Tenda a rullo opaca per esterni	0.04	0.06	0.08
Tenda a rullo traslucida per esterni	0.16	0.18	0.2
Oscurante interno	0.47	0.59	0.69
Tende opache per interni	0.37	0.46	0.55
Tende trasparenti per interni	0.39	0.48	0.58
Dispositivo in legno opachi per interni	0.35	0.46	0.58
Avvolgibile in plastica per esterni (con isolamento)	0.04	0.07	0.09
Oscuranti in legno, spessore da 25mm a 30mm	0.04	0.05	0.07

La frazione di tempo in cui la schermatura solare è utilizzata, $f_{sh,with}$, viene calcolata in base all'orientamento e al modello orario della radiazione solare (determinata attraverso il software *EnergyPlus*, che si basa sul modello di calcolo Perez). In particolare, essa rappresenta la frazione di tempo in cui la radiazione solare è al di sopra di un punto fissato in un dato orientamento.

Nel caso di una finestra con vetro basso emissivo, priva e privo di dispositivo di ombreggiatura, la trasmittanza di energia solare totale, g_{gl} , è calcolata secondo la relazione seguente:

$$g_{gl} = g_{gl,n} \cdot F_w$$

Eq. (3.23)

dove,

F_w , è il fattore di correzione per vetri basso emissivi (-);

$g_{gl,n}$, è la trasmittanza di energia solare totale per incidenza perpendicolare al vetro o SHGC (-).

Tuttavia, se la finestra è dotata di dispositivi di schermatura, o se il vetro disperde, allora è necessario calcolare una trasmittanza solare, mediata sul tempo, basata sulla somma ponderata delle frazioni di radiazione solare diretta e diffusa. Questo parametro è calcolato su base mensile attraverso la formula seguente:Eq. (3.24).

$$g_{gl} = a_{gl} \cdot g_{gl,alt} + (1 - a_{gl}) \cdot g_{gl,dif}$$

Eq. (3.24)

$$alt_g = \frac{\sum_1^n \alpha_i \cdot I_{dir,i}}{\sum_1^n I_{dir,i}}$$

Eq. (3.25)

$$a_{gl} = \frac{\sum_1^n I_{dir,i}}{\sum_1^n I_{sol,i}}$$

Eq. (3.26)

In cui,

a_{gl} , è il fattore di ponderazione, che dipende dalla posizione (orientamento, inclinazione) della finestra, dal clima e dalla stagione (-);

$g_{gl,alt}$, è la trasmittanza di energia solare per radiazione da un dato angolo di altitudine, che varia a seconda della alt_{gl} , rappresentativo della posizione (orientamento, inclinazione) della finestra, del clima e della stagione (-);

$g_{gl,dif}$, è la trasmittanza di energia solare per radiazione isotropa diffusa (-);

$I_{dir,i}$, è la radiazione solare diretta in un'ora i (W/m^2);

$I_{sol,i}$, è la radiazione solare media diretta in un'ora i (W/m^2);

α_i , è l'angolo di incidenza solare ($^\circ$);

n , è il numero delle ore in un mese.

I parametri relativi alla radiazione solare media diretta ($I_{dir,i}$) e totale (I_{sol}) e l'angolo di incidenza solare (α_i), sono ricavati dal software *EnergyPlus*, secondo il modello Perez che permette di effettuare i calcoli solari.

La frazione di area relativa al telaio della finestra, è F_F , calcolata in accordo alla norma ISO 10077-1 (2006). Questo parametro assume i valori pari a 0.2 e 0.3 che rappresentano i valori massimi di trasmittanza per la finestra; in particolare è stato assunto il valore predefinito pari a 0.3 nel caso di clima dominato da riscaldamento, valore rappresentativo della stagione invernale (ISO 13790, nota del paragrafo 11.4.5).

L'area proiettata totale del vano della finestra $A_{w,p}$, comprende la superficie vetrata e il telaio, poiché le proprietà termiche della finestra, assegnate nello strumento di calcolo, fanno riferimento all'elemento globale costituito da telaio e vetro dell'intera finestra. Tale metodologia è anche raccomandata dalla norma ISO 13789: 2007 inclusa nell'allegato B.

L'area effettiva di captazione solare degli **elementi opachi** è calcolata attraverso l'equazione seguente:

$$A_{sol} = \alpha_{S,c} \cdot R_{se} \cdot U_c \cdot A_c$$

Eq. (3.27)

dove,

$\alpha_{s,c}$, è il coefficiente di assorbimento adimensionale della radiazione solare dell'elemento opaco;

R_{se} , è resistenza termica della superficie esterna dell'elemento opaco, ricavato dalla norma dallo ISO 6946:2007 ($m^2.K/W$);

U_c , è la trasmittanza termica della parte opaca, calcolata in accordo alla ISO 6946:2007 ($W/m^2.K$);

A_c , è l'area proiettata (su un piano parallelo alla superficie) del componente vetrato (m^2).

Il coefficiente di assorbimento adimensionale della radiazione solare dipende dal colore della superficie esterna dell'elemento opaco (Tabella 3.15) (RCCTE, 2006).

Tabella 3.15 Coefficiente di assorbimento della radiazione solare dell'elemento opaco (RCCTE, 2006)

Colore	$\alpha_{s,c}$
Chiaro	0.3
Medio	0.5
Scuro	0.8

La radiazione solare incidente, $I_{sol,k}$, è un valore medio mensile, che dipende dal clima, dalla latitudine e dalla posizione (orientamento e inclinazione).

Il fattore di forma tra l'elemento k-esimo e la volta celeste, $F_{r,k}$, assume il valore 0.1 e 0.5 rispettivamente per gli elementi orizzontali e verticali privi di schermatura.

La radiazione termica verso il cielo, $\Phi_{r,k}$, è inclusa nel calcolo apporti dei apporti termici solari; tuttavia, è opportuno tener presente che si tratta di un trasferimento di calore per irraggiamento dovuto alla differenza di temperatura tra la superficie dell'elemento, assunta per ipotesi uguale alla temperatura esterna, e la temperatura del cielo. In dettaglio questo scambio termico è definito attraverso la relazione riportata di seguito (Eq. (3.28)):

$$\Phi_{r,k} = R_{se} \cdot U_c \cdot A_c \cdot h_r \cdot \Delta\theta_{er}$$

Eq. (3.28)

dove,

h_r , è il coefficiente di scambio termico per irraggiamento esterno ($W/m^2K^2.K$);

$\Delta\theta_{er}$, è la differenza media tra la temperatura dell'aria esterna e la temperatura apparente del cielo ($^{\circ}C$).

In particolare, la norma Lo ISO 13790:2008 postula che il coefficiente di trasferimento di calore per irraggiamento esterno, h_r ($W/m^2.K$), può essere considerato pari a 5ε (dove ε

è l'emissività del materiale), corrispondente ad una temperatura media di 10°C, tra la temperatura della superficie e quella del cielo.

In accordo allo standard ISO 13790 (paragrafo 11.4.6) la differenza media tra la temperatura dell'aria esterna e la temperatura atmosferica, $\Delta\theta_{er}$, può essere considerato pari a 9°C nelle regioni sub-polari, 13°C in quelle tropicali e 11°C nelle zone intermedie.

3.3.3.1.5 Parametri dinamici

Se si considera la modalità riscaldamento, il fattore di utilizzazione degli apporti termici, $\eta_{H,gn,m}$, è dato dalle seguenti espressioni:

$$\text{Se } \gamma_C > 0 \text{ e } \gamma_C \neq 1: \quad \eta_{C,Is} = \frac{1 - \gamma_C^{ac}}{1 - \gamma_C^{-(ac+1)}}$$

Eq. (3.29)

$$\text{Se } \gamma_C = 1: \quad \eta_{C,Is} = \frac{a_C}{a_C + 1}$$

Eq. (3.30)

$$\text{Se } \gamma_C < 0: \quad \eta_{C,Is} = 1$$

Eq. (3.31)

In cui,

$\gamma_H = Q_{H,gn}/Q_{H,ht}$, è il rapporto di bilancio termico, definito come il rapporto tra gli apporti termici mensili e lo scambio termico mensile ;

$a_H = a_{H,0} + \tau/\tau_{H,0}$, è un parametro numerico adimensionale;

$\tau = C_m/H$, è la costante di tempo della zona dell'edificio e tiene conto dell'inerzia termica dell'edificio e dello scambio termico per trasmissione e ventilazione;

$a_{H,0}$ e $\tau_{H,0}$, sono i parametri numerici di riferimento adimensionali, pari rispettivamente ai valori 1 e 15h15 (ISO 13790).

Il fattore di utilizzazione mensile per la modalità raffrescamento si ottiene attraverso una delle seguenti formule:

$$\text{Se } \gamma_C > 0 \text{ e } \gamma_C \neq 1: \quad \eta_{C,Is} = \frac{1 - \gamma_C^{ac}}{1 - \gamma_C^{-(ac+1)}}$$

Eq. (3.32)

$$\text{Se } \gamma_C = 1: \quad \eta_{C,Is} = \frac{a_C}{a_C + 1}$$

Eq. (3.33)

$$\text{Se } \gamma_C < 0: \quad \eta_{C,Is} = 1$$

Eq. (3.34)

I parametri usati per ricavare i fattori di utilizzazione sono simili a quelli descritti per la modalità riscaldamento; tuttavia per la modalità raffrescamento i valori numerici per i parametri di riferimento adimensionali $a_{c,0}$ e $\tau_{c,0}$ sono, rispettivamente, pari a 1 e 15 h in accordo alla norma ISO 13790.

La massa interna viene inclusa inserita nei calcoli attraverso il parametro relativo alla costante tempo della generica zona termica dell'edificio, τ , espresso in ore e ricavato dalla relazione seguente:

$$\tau = \frac{C_m}{3600 \cdot (H_{tr,adj} + H_{ve,adj})}$$

Eq. (3.35)

dove,

C_m , è la capacità termica interna dell'edificio o della zona dell'edificio (J/K);

$H_{tr,adj}$, è il coefficiente globale di scambio termico per trasmissione, ricavato dalla formula Eq. (3.9);

$H_{ve,adj}$, è il coefficiente globale di scambio termico per ventilazione, ricavato dalla formula Eq. 3.15.

La capacità termica interna dell'edificio, C_m (J/K), è stata computata come la somma tra le capacità termiche di tutti i componenti edilizi a contatto termico diretto con l'aria interna dell'edificio (ISO 13790), come determinato dalla seguente relazione:da

$$C_m = \sum_j k_j \cdot A_j$$

Eq. (3.36)

dove,

k_j , è il calore specifico per unità di area del j -esimo elemento dell'involucro edilizio (J/K.m²);

A_j , è l'area dell'elemento j -esimo dell'involucro edilizio (m²).

Il calore specifico per unità di area, k_j , è stato calcolato per ogni macro-componente in accordo allo standard EN ISO 13786:2007, Appendice A, che contempla un metodo semplificato per la valutazione di questo parametro.

Al fine di determinare in modo rapido la capacità termica interna dell'edificio, la norma ISO 13790 fornisce valori predefiniti a metro quadrato, per ogni categoria di edificio considerata (Tabella 3.16), facendo riferimento al metodo mensile e stagionale.

Tabella 3.16 – Valori predefiniti della capacità termica interna (ISO 13790, 2008)

Categoria	C_m [J/K]
Molto leggero	80000. A_f
Leggero	110000. A_f
Medio	165000. A_f
Pesante	260000. A_f
Molto spesante	370000. A_f

A_f - Area di piano

Periodo di utilizzo del riscaldamento e del raffrescamento

Al fine di stimare il fabbisogno energetico per il riscaldamento e per il raffrescamento durante i mesi di utilizzo, lo standard ISO 13790 introduce due metodi di valutazione, basati sul rapporto di bilancio termico e sui parametri numerici adimensionali a_c e a_H . Sebbene la norma considerata proponga due metodi, il presente volume farà riferimento solo al cosiddetto “metodo b” (ISO 13790 - paragrafo 7.4.1.1), che può essere implementato nel software oggetto di studio.

Modalità riscaldamento:

il primo passo per la stima della frazione di mese, in cui è richiesto un fabbisogno energetico per garantire il riscaldamento di un riscaldare ambiente, consiste nel calcolare il rapporto di bilancio termico $\gamma_{H,lim}$ come fattore di utilizzazione ideale per l’apporto termico $\eta_{H,gn}$. Quest’ultimo parametro assume un valore che rende nullo il fabbisogno energetico necessario per il riscaldamento dell’ambiente; in particolare, tale ragionamento è valido per un edificio ideale con infinita inerzia termica, in cui $\gamma_{H,lim} = 1.0$ e, quindi, $\eta_{H,gn} = 1.0$.

Tuttavia un edificio reale è caratterizzato da inerzia termica finita, perciò non tutti gli apporti termici riescono realmente a riscaldare lo spazio e a contribuire all’aumento della temperatura interna per garantire il comfort termico necessario (a causa del surriscaldamento). Pertanto, il fattore di utilizzazione sarà più basso, quindi, sarà necessario avere più apporti termici al fine di soddisfare l’equazione di bilancio termico, tale che il fabbisogno energetico risulti nullo. Questa considerazione, non è valida per lo scambio termico (se il rapporto di bilancio termico è più basso di 1, lo scambio termico risulta maggiore degli apporti termici; il fattore di utilizzazione degli apporti termici non può assumere un valore maggiore di 1, perciò non è possibile annullare il fabbisogno energetico e, quindi, ottenere un bilancio termico ottimale più basso di 1.0). Nel grafico in Figura 3.10 si esplicita quanto detto in precedenza.

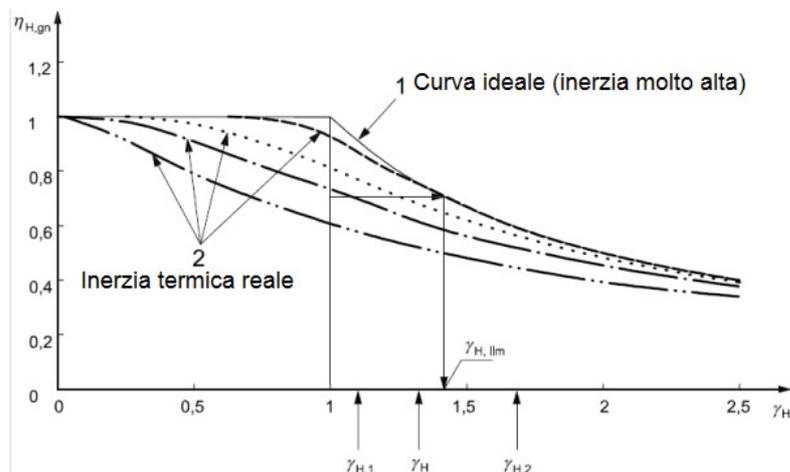


Fig. 3.10: Principali parametri per determinare la frazione di mese per il fabbisogno energetico necessario al raffreddamento e al riscaldamento (ISO 13790)

Il bilancio termico ottimale viene calcolato con la formula:

$$\gamma_{H,lim} = \frac{(a_H + 1)}{a_H}$$

Eq. (3.37)

Al fine di calcolare la frazione di mese per il fabbisogno energetico necessario per il riscaldamento, bisogna stimare γ_H per il primo e l'ultimo giorno del mese. Il valore medio di γ_H si ottiene attraverso la media dei valori di γ_H del mese considerato e del mese precedente

E' necessario introdurre due "nuovi" parametri $\gamma_{H,1}$ e $\gamma_{H,2}$; il primo si ottiene considerando il valore minimo tra i due parametri di γ_H calcolati attraverso il procedimento appena descritto; il secondo, $\gamma_{H,2}$, corrisponde al valore massimo/minimo. Tali parametri ($\gamma_{H,1}$ e $\gamma_{H,2}$) rappresentano i rapporti apporti/dispersioni, rispettivamente all'inizio e alla fine del mese e si calcolano attraverso le relazioni seguenti:

$$\text{Se } \gamma_{H,2} < \gamma_{H,lim}: f_H = 1$$

Eq. (3.38)

$$\text{Se } \gamma_{H,1} > \gamma_{H,lim}: f_H = 0$$

Eq. (3.39)

L'equazione (3.39) indica che se il rapporto apporti/perdite dei periodi estremi del mese è maggiore del valore ottimale, allora in quel mese non sarà necessario riscaldare l'ambiente. Tuttavia, se nessuna di queste condizioni si verifica, saranno applicate le relazioni riportate di seguito:

$$\text{Se } \gamma_H > \gamma_{H,lim}: f_H = 0,5 \cdot \frac{\gamma_{H,lim} - \gamma_{H,1}}{\gamma_H - \gamma_{H,1}}$$

Eq. (3.40)

$$\text{Se } \gamma_H \leq \gamma_{H,lim}: f_H = 0,5 + 0,5 \cdot \frac{\gamma_{H,lim} - \gamma_H}{\gamma_{H,2} - \gamma_H}$$

Eq. (3.41)

Queste equazioni seguono la stessa logica delle relazioni (3.38) e (3.39), con la differenza che nel caso dell'equazione (3.40) e (3.41) il valore γ_H si riferisce al valore medio mensile e non al valore del primo e dell'ultimo giorno del mese.

La durata della stagione in cui si utilizza il riscaldamento può essere determinata anche attraverso la somma di f_H calcolati per ogni mese, per esempio:

$$L_H = \sum_{m=1}^{12} f_{H,m}$$

Eq. (3.42)

Modalità raffrescamento:

Per la modalità raffrescamento vale lo stesso ragionamento fatto per la modalità riscaldamento; pertanto, non sarà necessario aggiungere ulteriori spiegazioni. Il valore della frazione del mese relativa al fabbisogno energetico per il raffrescamento è calcolato attraverso l'inverso del rapporto del bilanciamento ottimale, $(1/\gamma_C)_{lim}$, ovvero attraverso la relazione seguente:

$$(1/\gamma_C)_{lim} = (a_c + 1)/a_c$$

Eq. (3.43)

Dunque, i valori limite dei parametri, $(1/\gamma_C)_1$ e $(1/\gamma_C)_2$ si ottengono attraverso le equazioni (3.44) e (3.45):

$$\text{Se } (1/\gamma_C)_2 < (1/\gamma_C)_{lim}: f_c = 1$$

Eq. (3.44)

$$\text{Se } (1/\gamma_C)_1 > (1/\gamma_C)_{lim}: f_c = 0$$

Eq. (3.45)

Come già esposto per la modalità riscaldamento, qualora tali condizioni non siano verificate, si considerano le seguenti relazioni:

$$\text{Se } (1/\gamma_C) > (1/\gamma_C)_{lim} : f_C = 0,5 \cdot \frac{(1/\gamma_C)_{lim} - (1/\gamma_C)_1}{(1/\gamma_C) - (1/\gamma_C)_1}$$

Eq. (3.46)

$$\text{Se } (1/\gamma_C) \leq (1/\gamma_C)_{lim} : f_C = 0,5 + 0,5 \cdot \frac{(1/\gamma_C)_{lim} - (1/\gamma_C)}{(1/\gamma_C)_2 - (1/\gamma_C)}$$

Eq. (3.47)

La stagione del raffrescamento può essere calcolata anche sommando tutte le f_C di ogni mese, come espresso esprime nella formula seguente (3.48):

$$L_C = \sum_{m=1}^{12} f_{C,m}$$

Eq. (3.48)

Fabbisogno energetico per gli impianti ad intermittenza

Quando gli impianti HVAC operano secondo una determinata programmazione (per esempio secondo la modalità ad intermittenza), la norma ISO 13790 (2008) fornisce una guida per determinare il fabbisogno energetico ridotto basato sul calcolo della modalità continua, descritto nelle precedenti relazioni Eq. (3.6) e Eq. (3.7). In particolare il fabbisogno energetico per il riscaldamento e il raffrescamento, $Q_{H,nd}$ e $Q_{C,nd}$, è ridotto attraverso i coefficienti adimensionali di riduzione per il sistema di raffrescamento e di riscaldamento ad intermittenza, $a_{C,red}$ e $a_{H,red}$. Inoltre, si considerano anche le frazioni del mese per il fabbisogno energetico nelle modalità riscaldamento e raffrescamento, $f_{H,m}$ e $f_{C,m}$:

$$Q_{H,nd,interm,m} = f_{H,m} \cdot a_{H,red} \cdot Q_{H,nd,cont,m}$$

Eq. (3.49)

$$Q_{C,nd,interm,m} = f_{C,m} \cdot a_{C,red} \cdot Q_{C,nd,cont,m}$$

Eq. (3.50)

La costante di tempo dell'edificio, τ , e i rapporti di bilancio termico, γ_H e γ_C , influenzano anche il coefficiente di riduzione del fabbisogno energetico dovuto all'operazione di intermittenza degli impianti HVAC, come si osserva nelle equazioni seguenti: seguono

$$a_{H,red} = 1 - b_{H,red} \cdot \frac{\tau_{H,0}}{\tau} \cdot \gamma_H \cdot (1 - f_{H,hr}), \text{ con } f_{H,hr} \leq a_{H,red} \leq 1.0$$

Eq. (3.51)

$$a_{C,red} = 1 - b_{C,red} \cdot \frac{\tau_{C,0}}{\tau} \cdot \gamma_C \cdot (1 - f_{C,day}), \text{ con } f_{C,day} \leq a_{C,red} \leq 1.0$$

Eq. (3.52)

dove,

b_{red} , è un parametro fisso, considerato fisso, pari a 3 (sia per la modalità riscaldamento che raffrescamento);

$f_{H,hr}$, è la frazione del numero di ore in cui gli impianti sono in uso;

$f_{C,day}$, è la frazione del numero dei numeri di giorni a settimana in cui gli impianti sono attivi.

3.3.3.2 Fabbisogno energetico per la produzione di ACS

Il fabbisogno energetico per la produzione di ACS, espressa in $MJ/mese$, calcolata in accordo alla EN 15316-3-1 (2007), dipende dal tipo di edificio, dalla superficie del piano e dalla differenza di temperatura tra la temperatura dell'acqua in ingresso e quella di mandata desiderata, secondo la formula seguente:

$$Q_{DHW,nd,m} = 4,182 \cdot V_{W,m} \cdot (\theta_{W,t} - \theta_{W,o})$$

Eq. (3.53)

in cui,

$V_{W,m}$ è il volume di ACS necessario mensilmente come prescritto nella EN 15316-3-1 (2007);

$\theta_{W,t}$ è la temperatura di mandata dell'ACS [$^{\circ}C$];

$\theta_{W,o}$, è la temperatura dell'acqua in ingresso [$^{\circ}C$].

Nel caso di abitazione unifamiliare, il fabbisogno di volume di acqua calda sanitaria giornaliero dipende dalla superficie del piano ed è calcolata (in m^3/day) come riportato di seguito: segue,

$$V_w = \frac{a \cdot N_U}{1000}$$

Eq. (3.54)

dove,

a , è il requisito di unità basato sui litri di acqua a $60^{\circ}C/giorno$;

N_U , è il numero di unità da considerare.

Il fabbisogno di volume mensile di ACS, $V_{w,m}$, può essere calcolato moltiplicando il valore giornaliero, V_w , per il numero dei giorni del mese.

I parametri a e N_U , dipendono dal tipo di edificio e dagli occupanti/attività e possono essere calcolati considerando la superficie del piano, A_f , attraverso la seguente relazione

$$\text{Se } A_f > 30m^2: a = \frac{62 \cdot \ln(A_f) - 160}{A_f}$$

Eq. (3.55)

$$\text{Se } 15 \leq A_f \leq 30m^2: a = 2$$

Eq. (3.56)

3.3.3.3 Consumo di energia

Il fabbisogno energetico calcolato non tiene conto né dell'efficienza degli impianti installati all'interno degli edifici per il condizionamento degli ambienti, né della produzione di ACS. L'algoritmo consente di considerare impianti con rendimenti differenti all'interno di uno stesso edificio, poiché spesso accade, che i COP (*Coefficient Of Performance*) del riscaldamento e del raffreddamento non risultano uguali. Sulla base di questa precisazione, è evidente che l'energia necessaria per ogni impianto (raffrescamento, riscaldamento, produzione di ACS) dipende dall'efficienza dell'apparecchiatura corrispondente. La formula generale per il calcolo del consumo di energia che può essere applicata per ogni tipo di energia è la seguente:

$$Q_{cons} = \frac{Q_{nd}}{\eta_{sys}}$$

Eq. (3.57)

In cui,

Q_{nd} , è il fabbisogno energetico;

η_{sys} , è il rendimento dell'impianto.

I valori predefiniti adottati relativi all'efficienza energetica dell'impianto e al tipo di energia consumata sono descritti nella Tabella 3.17, Tabella 3.18 e Tabella 3.19; la maggior parte di questi valori sono stati ricavati dal *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios*, RCCTE (2006).

Tabella 3.17: Efficienza dell'impianto di riscaldamento ed energia impiegata

Tipo di impianto	$\eta_{H,sys}$	Tipo di energia
Riscaldamento elettrico	1	Elettricità
Riscaldamento a gas	0.87	Combustibile a gas
Riscaldamento a combustibile liquido	0.8	Combustibile liquido
Riscaldamento a combustibile solido	0.6	Combustibile solido
Split (Riscaldamento)	4	Elettricità

Tabella 3.18: Efficienza dell'impianto di raffrescamento ed energia impiegata

Tipo di impianto	$\eta_{C,sys}$	Tipo di energia
Split (Raffrescamento)	3	Elettricità
Macchina di refrigerazione (ciclo di compressione)	3	Elettricità
Macchina di refrigerazione (ciclo di assorbimento)	0.8	Elettricità

Tabella 3.19: Efficienza dell'impianto per l'ACS ed energia impiegata

Tipo di impianto	$\eta_{DHW,sys}$	Tipo di energia
Caldaia elettrica	0.9	Elettricità
Caldaia a gas	0.6	Gas
Caldaia autonoma a condensazione	0.72	Gas
Caldaia autonoma	0.4	Gas

Il consumo di energia totale dell'edificio è determinato attraverso la somma di tutte le aliquote che contribuiscono a determinare l'energia in uso tutta:

$$Q_{Tot,cons} = \frac{Q_{H,nd}}{\eta_{H,sys}} + \frac{Q_{C,nd}}{\eta_{C,sys}} + \frac{Q_{DHW,nd}}{\eta_{DHW,sys}}$$

Eq. (3.58)

L'energia primaria è calcolata moltiplicando il fattore di conversione, F_{pu} , [kgoe/kWh] per l'energia impiegata,

$$Q_{Tot,prim} = F_{H,pu} \cdot Q_{H,cons} + F_{C,pu} \cdot Q_{C,cons} + F_{DHW,pu} \cdot Q_{DHW,cons}$$

Eq. (3.59)

Il fattore di conversione del consumo di energia (o uso) per l'energia primaria dipende dal carburante (o dal tipo di energia) di ciascun impianto. I valori predefiniti sono stati ricavati dal RCCTE (2006) e riportati in Tabella 3.20.

Tabella 3.20: Fattore di conversione dell'energia usata per l'energia primaria (RCCTE, 2006)

Tipo di energia	F_{pu} [kgoe/kWh]
Elettricità	0.29
Combustibile a gas, liquido o solido	0.086

3.3.3.4 Inerzia termica

Il calcolo dell'inerzia termica interna di un edificio, viene effettuato in accordo quanto prescritto nella ISO 13790 e precedentemente descritto nella formula (3.36). La capacità termica interna per superficie di ogni macro-componente si calcola nel rispetto dell'Appendice A della norma EN ISO 13786 (2007); si tratta di una procedura

semplificata che si basa sulla profondità di penetrazione dell'onda di calore, calcolata per i materiali adiacenti alla superficie interna. Nel metodo prescritto, si considera la capacità termica dei vari strati, con uno spessore massimo di 100 mm (misurato dalla superficie interna).

3.3.3.5 Ponti termici

Il valore della trasmittanza termica (U) consente di tenere conto dei ponti termici, generati, per esempio, nei montanti in acciaio (Fig. 3.11) all'interno degli elementi costruttivi quali pareti e solai.

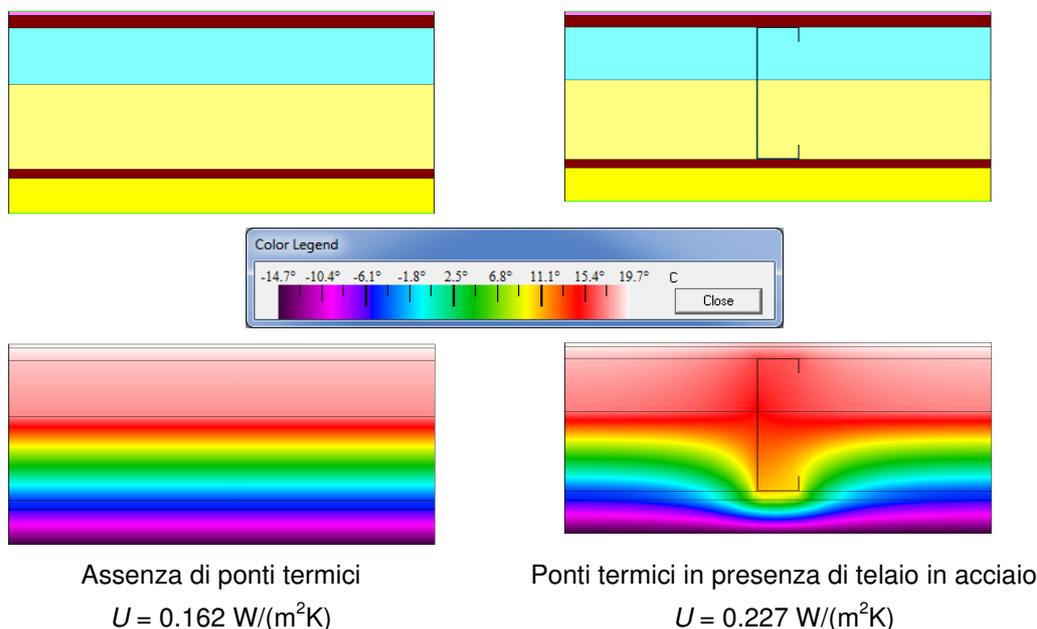


Fig. 3.11: Influenza dei ponti termici sui i valori della trasmittanza termica per un piano fuori terra di una struttura in acciaio leggero

Precisando che si trascura l'effetto lineare e puntuale dei ponti termici; il valore della trasmittanza termica (U) è incluso nel database del software per ciascuno dei macro-componenti.

I valori della trasmittanza (U) degli elementi che fanno da ponte termico sono determinati attraverso la metodologia descritta nella Sezione 6 della norma ISO 6946 (2007) e perfezionata da Gorgolewski (2007), poiché il metodo descritto nella norma può essere applicato solo se lo strato di materiale isolante non è collegato ai telai in acciaio.

Il secondo metodo consiste nella determinazione di due limiti di resistenza termica dell'elemento costruttivo e i fattori di correzione dipendono dalle dimensioni dei montanti e dall'interasse. Il valore limite inferiore è calcolato combinando in parallelo le resistenze degli strati, per esempio considerando che ogni piano abbia la stessa temperatura.

Un valore limite più alto della resistenza termica può essere anche calcolato attraverso la somma delle resistenze di ogni mezzo di trasmissione di calore. Quando non si presenta

nessun fenomeno di ponte termico nell'elemento, si procede all'applicazione del metodo per strati omogenei, che tiene conto del circuito di resistenze termiche in serie.

3.3.4 Calibrazione dell'algoritmo

Al fine di controllare e migliorare la precisione dell'algoritmo implementato per stimare il fabbisogno energetico per il riscaldamento e il raffrescamento di un edificio, sulla base del metodo mensile quasi-stazionario proposto dalla ISO 13790, sono state effettuate diverse verifiche e procedure di calibrazione.

In particolare nella prima parte di questa sezione viene presentata l'applicazione dell'algoritmo mensile a dodici casi studio prescritti dallo standard EN 15265, considerando un vano adibito ad ufficio, al fine di verificare la precisione dell'algoritmo. In seguito, partendo dal presupposto che gli edifici presentano una struttura più complessa, l'algoritmo è stato calibrato per un edificio residenziale multi-comparto, applicando i fattori di correzione a quattro componenti principali del bilancio termico e ai parametri dinamici adimensionali.

Infine, nell'ultimo capitolo del volume (paragrafo 4.2) verrà presentato un caso studio, costituito da un edificio residenziale, in modo da validare l'algoritmo calibrato, confrontando i risultati con quelli ottenuti dall'analisi dinamica avanzata effettuata con il software *DesignBuilder/ EnergyPlus*.

3.3.4.1 Verifica della precisione secondo la EN 15265

In questo paragrafo saranno presentati alcuni casi studio impiegati per verificare la precisione dell'algoritmo mensile; in particolare sono stati considerati 12 test (Tabella 3.21) definiti dallo standard EN 15265 (2007) per un vano adibito ad ufficio (Fig. 3.12).

La norma considera una stanza tipo, caratterizzata da una parete vetrata rivolta ad ovest, analizzata facendo variare alcune condizioni al contorno, quali gli apporti solari interni, la modalità di riscaldamento/raffrescamento (continuo o ad intermittenza).

La norma fornisce i risultati di riferimento relativi al fabbisogno energetico per il riscaldamento e il raffrescamento, in relazione ad ognuno dei dodici casi studio in esame, considerando una specifica posizione geografica (Trappes, Francia), della quale si conoscono i dati climatici fondamentali: temperatura esterna e radiazione solare (per ogni ora).

L'importanza di valutare l'accuratezza dei termini che contribuiscono al bilancio termico e che non sono forniti dalla norma EN 15265, ha indotto ad esaminare i casi studio ricorrendo al software di calcolo dinamico avanzato *DesignBuilder* che utilizza l'algoritmo di simulazione di *EnergyPlus*.

Tabella 3.21: Casi studio prescritti nella EN 15265 (2007) per validare il calcolo delle energia necessaria per il riscaldamento e il raffreddamento di un ambiente usando il metodo dinamico

Informativo	Normativa		Normativa	
Test 1 Caso base	Test 5 = Test 1 +	HVAC ad intermittenza (solo 8h00-18h00 da Lunedì a Venerdì)	Test 9 = Test 5 +	Copertur a esterna
Test 2 Maggiore inerzia termica	Test 6 = Test 2 +		Test 10 = Test 6 +	
Test 3 Nessun guadagno interno	Test 7 = Test 3 +		Test 11 = Test 7 +	
Test 4 Nessuna protezione solare	Test 8 = Test 4 +		Test 12 = Test 8 +	

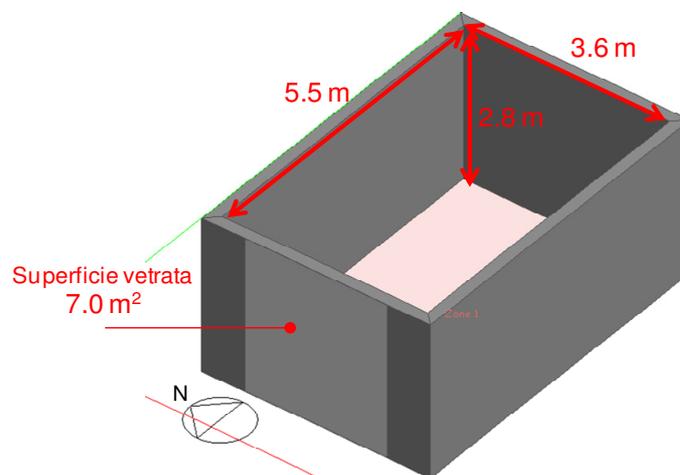
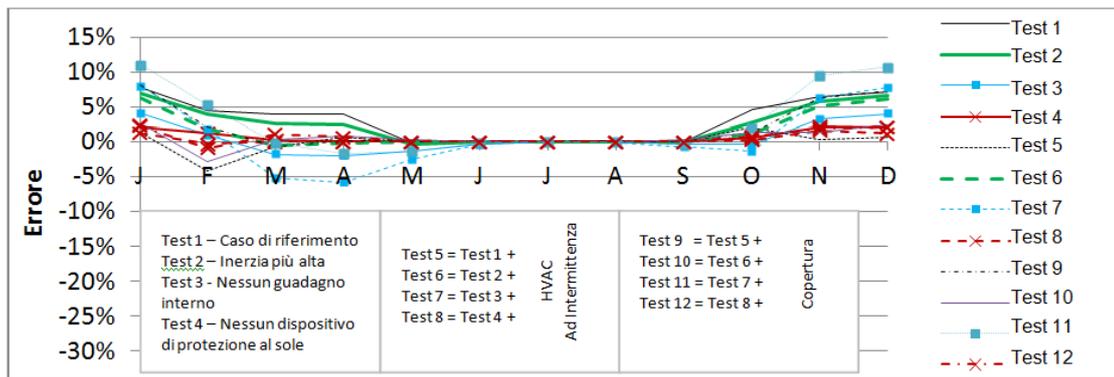
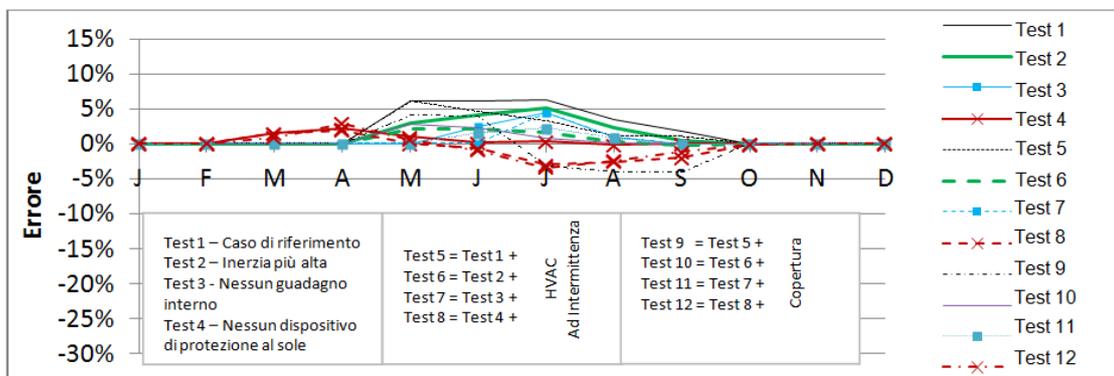


Fig. 3.12: Modello di un vano per ufficio secondo la norma EN 15265

La stanza analizzata è stata completamente definita sia nel software dinamico che nell'algoritmo mensile, al fine di ottenere le stime del fabbisogno energetico. Il grafico in Figura 3.13 mostra gli errori ottenuti con l'approccio quasi stazionario presentato su base mensile (con riferimento ai risultati di simulazione dinamica forniti dall'algoritmo del software *EnergyPlus*) e calcolati come percentuale del fabbisogno energetico totale annuo. L'errore massimo mensile risulta inferiore al 12% ed è maggiore nei mesi estivi e invernali, rispettivamente, per le modalità di raffreddamento e riscaldamento (Fig. 3.13).



a) Modalità riscaldamento



b) Modalità raffrescamento

Fig. 3.13: Errori mensili dell'algoritmo (metodo mensile quasi-stazionario) – Andamento di riferimento: EnergyPlus (metodo dinamico avanzato)

3.3.4.2 Fattori di calibrazione

Il metodo mensile quasi-stazionario prevede diverse semplificazioni rispetto alle simulazioni dinamiche avanzate, basate su dati giornalieri. In particolare, i parametri presenti nel metodo semplificato, che presentano le differenze maggiori rispetto al metodo dinamico, sono:

- (i) i fattori di utilizzazione mensili, $\eta_{H,gn.m}$ e $\eta_{C,ls.m}$, assunti costanti e indipendenti dai dati e dal programma di occupazione, all'interno di ogni regione climatica;
- (ii) le diverse aliquote dell'energia, Q_{tr} , Q_{ve} , Q_{int} e Q_{sol} , determinate considerando le temperature interne costanti, fissate per il riscaldamento e il raffrescamento.

Inoltre, anche i dati climatici, il programma di occupazione e la struttura della costruzione influenzano le suddette variabili.

Nonostante l'approccio mensile quasi-stazionario sia ben correlato ai casi studio previsti dalla norma EN 15265, le prestazioni degli edifici caratterizzati da una struttura più complessa, in condizioni di utilizzo e climi diversi, possono differire in modo significativo dai risultati ottenuti attraverso questo approccio semplificato.

Lo standard ISO 13790 quantifica le potenziali differenze considerando un range compreso tra il 50% e il 150% e presenta, nell'Appendice I, una procedura attraverso la quale ricavare i fattori di utilizzo mensile. Al fine di minimizzare la possibile dispersione, sono stati definiti nuovi fattori di correzione calibrati per migliorare le stime dei diversi termini che entrano in gioco nel bilancio di energia: (i) scambio termico per trasmissione; (ii) scambio termico per ventilazione; (iii) apporti termici interni; (iv) apporti termici solari, come mostrato nelle seguenti equazioni (3.60), (3.62) e (3.62),

$$H_{tr,adj,c} = f_{tr} \cdot H_{tr,adj} \rightarrow Q_{tr,m} = H_{tr,adj,c} \cdot (\theta_{int,sec,H} - \theta_e) \cdot t$$

Eq. (3.60)

$$H_{ve,adj,c} = f_{ve} \cdot H_{ve,adj} \rightarrow Q_{ve,m} = H_{ve,adj,c} \cdot (\theta_{int,sec,H} - \theta_e) \cdot t$$

Eq. (3.61)

$$Q_{gn} = f_{int} \cdot Q_{int,m} + f_{sol} \cdot Q_{sol,m}$$

Eq. (3.62)

in cui,

$H_{tr,adj,c}$ è lo scambio termico per trasmissione corretto;

f_{tr} è il coefficiente di correzione per lo scambio termico per trasmissione;

$H_{ve,adj,c}$ è lo scambio termico per ventilazione corretto;

f_{ve} è il coefficiente di correzione per lo scambio termico per ventilazione;

f_{int} è il coefficiente di correzione per gli apporti termici interni;

f_{sol} è il coefficiente di correzione degli apporti termici solari, escludendo la radiazione termica verso il cielo.

Si precisa che i diversi fattori di correzione sono stati calibrati per ogni regione climatica, così come i parametri numerici adimensionali, a_{H0} , τ_{H0} , a_{C0} e τ_{C0} .

Oltre ai fattori di correzione precedentemente descritti per le quattro principali componenti di trasferimento di calore, sono stati calibrati per ogni regione climatica anche i parametri adimensionali, a_{H0} , τ_{H0} , a_{C0} e τ_{C0} .

Lo scopo dell'algorithmo mensile è quello di stimare una previsione del fabbisogno energetico degli edifici, perciò il metodo in esame non si concentra su un solo compartimento come prescritto nella norma EN 15265 (2007), ma tutte le calibrazioni sono state, effettuate su nuova serie di casi studio considerando le caratteristiche di una costruzione reale (per esempio un appartamento) (Fig. 3.14).

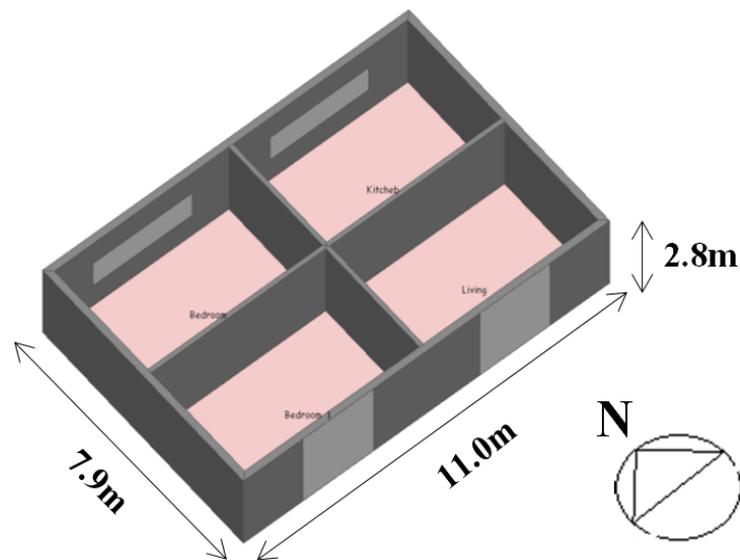


Fig. 3.14: Esempio di un modello utilizzato nei test per calibrare l'algoritmo mensile

Questi casi studio aggiornati usano le stesse proprietà termiche considerate per gli esempi definiti dalla norma EN 15265 (2007,) (Table 3.22), ma presentano diverse condizioni al contorno (pareti e copertura non adiabatiche) e una superficie di piano maggiore (79.2 m²). Infine si si ipotizza che il flusso d'aria costante sia pari ad 1,0 ricambio d'aria all'ora.

Table 3.22 –Proprietà termiche determinate dai casi studio

Elemento	Trasmittanza (U) [W/m ² .K]	K_m [J/m ² .K]
Parete esterna	0.493	81297
Parete interna	-	9146
Copertura	0.243	6697
Piano terra	-	63380

Un'importante modifica nei modelli di calibrazione è stata effettuata in relazione al programma di occupazione e di funzionamento degli impianti, poiché i casi studio della EN 15265 (2007) includono compartimenti ad uso ufficio.

I nuovi programmi di occupazione e i rispettivi flussi termici per gli edifici residenziali sono stati ricavati dalla ISO 13790 (2008), come descritto precedentemente nella Tabella 3.13.

Le superfici vetrate giocano un ruolo molto importante nel calcolo degli apporti termici e delle dispersioni di calore per trasmissione, perciò sono state studiate diverse condizioni di rapporto tra la superficie della parete e del pavimento (Tabella 3.23). Inoltre, nel processo di calibrazione sono stati considerati anche diversi scenari in cui si prevede la presenza o l'assenza del dispositivo di oscuramento.

Test	GFR [%]	NGWR [%]	SGWR [%]	Oscurante
T1	35	36	54	ON
T2				OFF
T3	25	20	40	ON
T4				OFF
T5	15	12	24	ON
T6				OFF

GFR: rapporto (in percentuale) tra la superficie vetrata e il pavimento;

NGWR: rapporto (in percentuale) tra la superficie vetrata orientate a nord e la parete;

SGWR: rapporto (in percentuale) tra la superficie vetrata orientate a sud e la parete.

Tutti i casi studio sono stati analizzati per cinque regioni climatiche: (i) *Csa*; (ii) *Csb*; (iii) *Cfb*; (iv) *Dfb*; e (v) *Dfc*. I fattori di correzione sono stati ricavati minimizzando l'errore per ciascuno dei sottoinsiemi dei casi studio per ogni regione climatica che, in alcuni casi, ha richiesto 500 simulazioni. Il grafico in Figura 3.15 mostra i miglioramenti di precisione ottenuti con e senza i fattori di correzione per la zona climatica *Dfb*, sottolineando che i miglioramenti medi variano dal 43% di errore assoluto ad un valore inferiore al 2%.

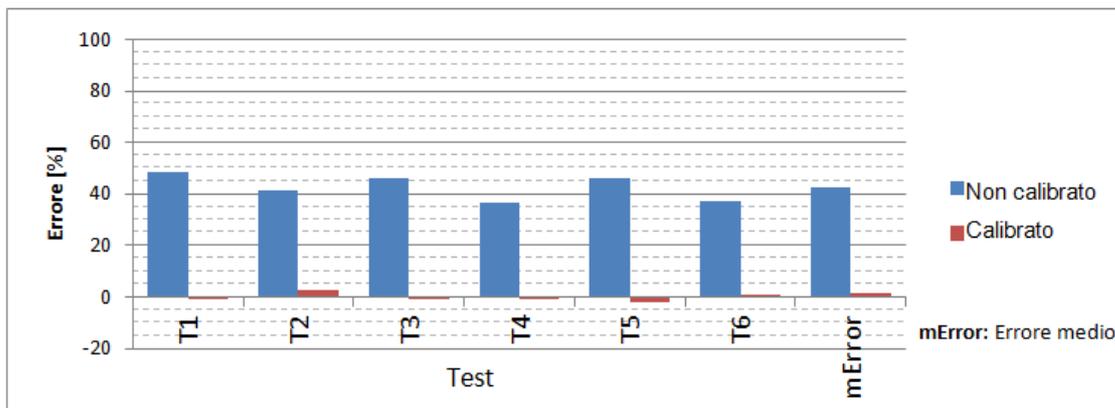


Fig. 3.15: Miglioramento della precisione del metodo mensile ISO 13790 per il clima *Dfb*: energia totale annua per il riscaldamento e il raffreddamento

Il grafico in Figura 3.16 riassume i miglioramenti per le cinque regioni climatiche considerate. E' interessante notare che, in assenza dei fattori di correzione, l'accuratezza del metodo risulta inferiore per i climi più freddi, infatti l'errore maggiore si verifica per la regione climatica *Dfc*; il più basso, invece, per la regione climatica *Csb*. Il metodo mensile ha mostrato una minore precisione nella stima del fabbisogno energetico per i mesi più freddi, in quanto il confronto con il metodo dinamico dimostrò che gli apporti termici per il riscaldamento degli ambienti risultano più consistenti rispetto a quanto ottenuto con il metodo semplificato.

Tale effetto è anche più rilevante ed evidente quando si considerano apporti solari più bassi; globalmente, in presenza di fattori di correzione, tutti gli errori sono minori del 10%.

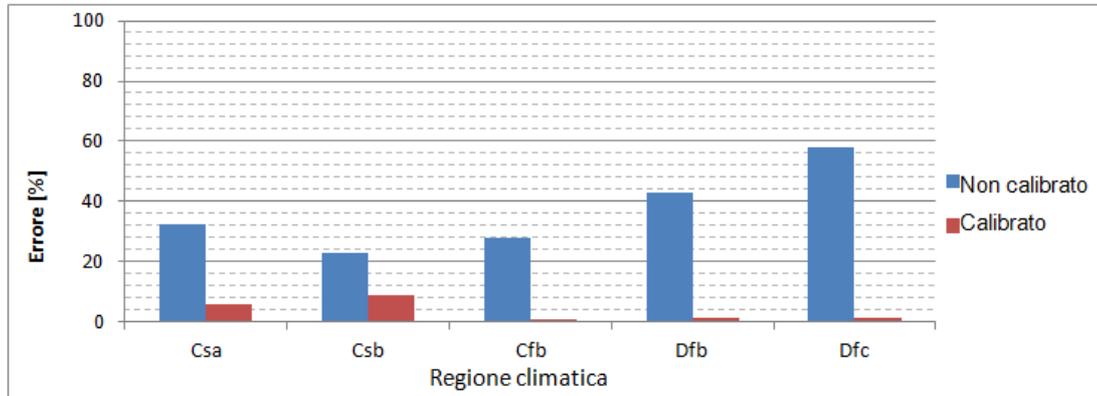


Fig. 3.16: Principale errore del metodo mensile con e senza i fattori di calibrazione

Si noti che emerge un diverso margine di errore a seconda che si considerino o meno scenari in cui è prevista la presenza di dispositivi di ombreggiamento; pertanto, si possono distinguere due diversi fattori di calibrazione (Tabella 3.23 e Tabella 3.24).

Tabella 3.23 – Fattori di calibrazione per scenari con dispositivi di ombreggiamento attivati

Dispositivi di ombreggiamento attivati (ON)												
Regione climatica	Modalità riscaldamento						Modalità raffrescamento					
	a_{H0}	τ_{H0}	Q_{tr}	Q_{ve}	Q_{sol}	Q_{int}	a_{C0}	τ_{C0}	Q_{tr}	Q_{ve}	Q_{sol}	Q_{int}
Csa	1.00	15.67	1.00	1.00	0.90	0.93	1.20	15.00	1.07	1.00	0.83	0.90
Csb	1.33	15.00	1.00	1.07	0.97	0.93	1.10	15.00	1.03	1.10	0.97	1.00
Cfb	1.33	15.00	0.93	0.83	1.10	1.07	1.30	15.00	1.00	1.00	1.00	1.03
Dfb	1.30	14.67	0.83	0.90	1.25	1.25	1.00	15.00	1.07	1.07	0.97	1.00
Dfc	1.25	14.33	0.83	0.83	1.17	1.50	1.00	15.00	1.00	1.00	1.00	1.00

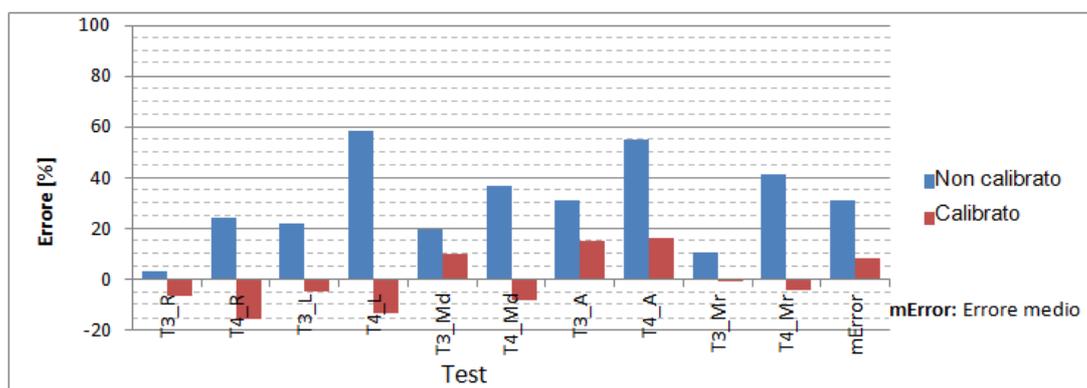
L'algoritmo mensile permette di considerare diverse modalità di attivazione per i dispositivi di ombreggiamento per l'inverno e l'estate, perciò i fattori di calibrazione della Tabella 3.23 sono implementati per la modalità raffrescamento e quelli della Tabella 3.24 per la modalità riscaldamento.

I fattori di calibrazione sono stati applicati ai casi studio 3 e 4 (rapporto del 25% tra la superficie vetrata e il pavimento, Tabella 3.23) collocati in cinque città delle regioni climatiche *Csa* e *Dfb*, al fine di valutare l'errore che ne deriva considerando il clima di ogni località.

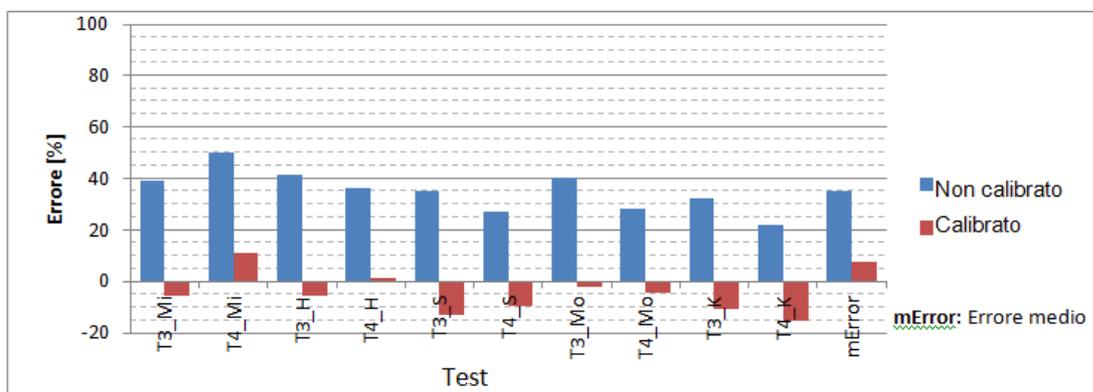
Tabella 3.24 – Fattori di calibrazione per scenari con dispositivi di ombreggiamento disattivati

Regione climatica	Dispositivi di ombreggiamento disattivati (OFF)											
	a_{H0}	τ_{H0}	Q_{tr}	Q_{ve}	Q_{sol}	Q_{int}	a_{C0}	τ_{C0}	Q_{tr}	Q_{ve}	Q_{sol}	Q_{int}
Csa	0.93	15.0	1.00	1.00	1.03	1.03	1.25	15.0	1.17	1.33	0.83	0.90
Csb	1.13	15.0	1.00	0.97	1.03	1.00	0.93	15.0	1.08	1.17	0.87	0.87
Cfb	1.17	15.0	1.00	0.93	1.00	1.03	1.08	15.0	1.08	1.33	0.90	0.87
Dfb	1.33	15.0	0.93	0.87	1.17	1.10	1.20	15.0	1.00	1.00	0.83	0.90
Dfc	1.50	14.0	0.80	0.80	1.07	1.20	1.00	15.0	1.17	1.17	0.92	0.90

Tale aspetto è mostrato graficamente in Figura 3.17, in cui si nota che l'errore prodotto varia a seconda della località; in particolare gli errori più elevati si verificano per la città di Atene (16,2%) e di Kiev (15,5%), poste rispettivamente nelle regioni climatiche Csa e Dfb; nonostante l'errore medio risulti più basso del 10% per queste due regioni climatiche (Csa: 8,2% e Dfb: 7,9%).



a) R:Roma; L: Lisbona; Md: Madrid; A: Atene; Mr: Marsiglia



b) Mi: Minsk; H: Helsinki; S: Stoccolma; Mo: Mosca; K: Kiev

Fig. 3.17: Analisi della precisione di calibrazione per alcune città delle regioni climatiche: a) Csa; b) Dfb

4 VALIDAZIONE DELLE METODOLOGIE ADOTTATE

Nel presente capitolo sarà analizzato un caso studio, conducendo un'analisi LCA che tenga conto dei due approcci proposti nei capitoli precedenti. Lo scopo del presente studio è di validare le due metodologie semplificate confrontando i risultati ottenuti con quelli ricavati utilizzando un approccio avanzato.

In particolare l'analisi degli impatti ambientali dell'intero ciclo di vita e la quantificazione del fabbisogno energetico, secondo un approccio rigoroso sono state condotte rispettivamente con i software *GaBi 6* (2012) e *DesignBuilder* (2012).

4.1 Validazione del metodo per macro-componenti

La validazione del metodo per macro-componenti è stata condotta considerando un edificio residenziale, situato in Portogallo. I risultati ottenuti con questo metodo semplificato sono stati confrontati con quelli ottenuti utilizzando il software GaBi.

4.1.1 Descrizione del caso studio

L'edificio oggetto di studio è una residenza unifamiliare, che si sviluppa su due piani fuori terra, ubicata a Coimbra (Portogallo); di seguito si riportano i prospetti (Fig. 4.1) e le piante (Fig. 4.2).



Fig. 4.1: Prospetti

L'edificio, alto 6 m, ha una superficie totale pari a circa 202.00 m², equamente distribuita tra i due piani (100.8 m²). In particolare il primo piano presenta una superficie di 20.2 m² adibita a terrazzo.

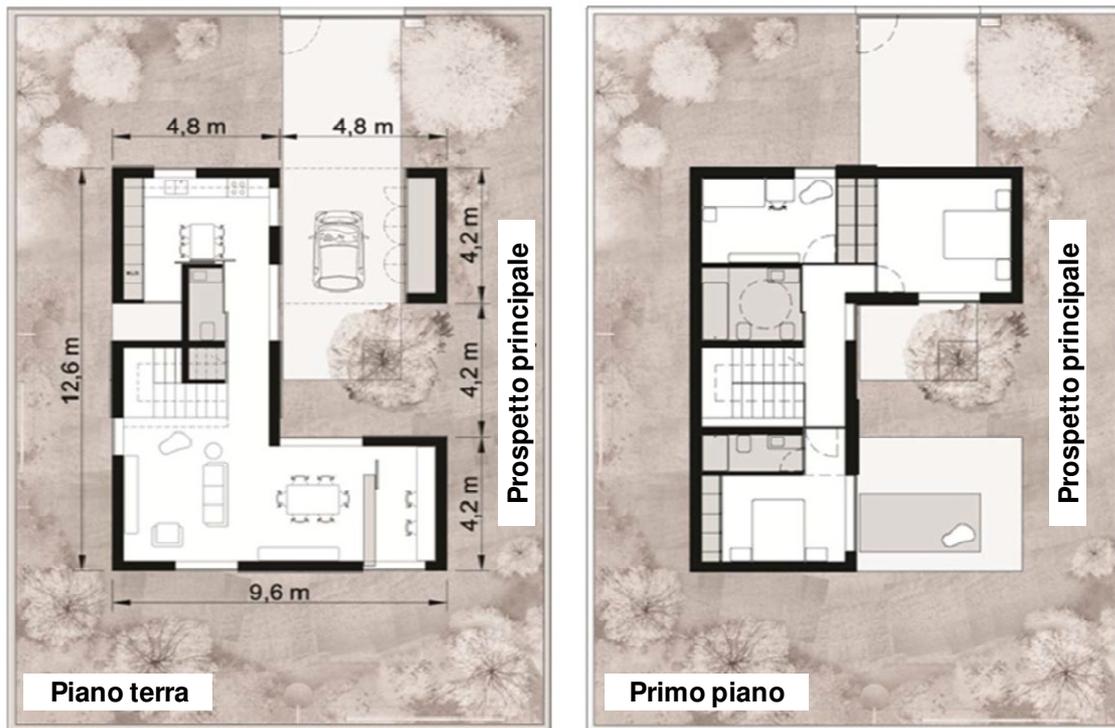


Fig. 4.2: Piante

Le superfici vetrate di ogni prospetto sono evidenziate in pianta.
La Tabella 4.1 riassume le superfici dell'involucro dell'edificio.

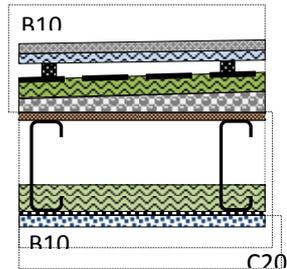
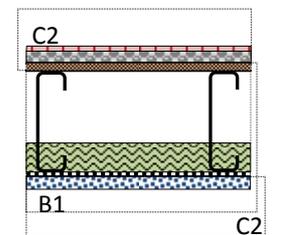
Tabella 4.1: Superficie delle pareti e superficie vetrata della fase preliminare

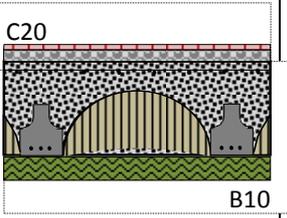
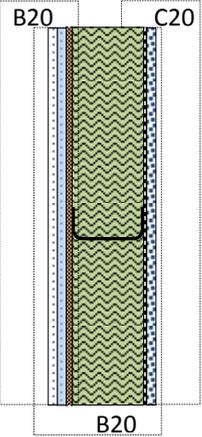
	Nord [m ²]	Est [m ²]	Sud [m ²]	Ovest [m ²]	Totali [m ²]
Pareti	41.3	49.9	38.3	60.4	189.9
Finestre	13.0	17.3	15.6	4.3	50.2

4.1.2 Scelta dei macro-componenti

Per effettuare l'analisi degli impatti ambientali dell'edificio, sono stati scelti i macro-componenti descritti e riportati in Tabella 4.2.

Tabella 4.2: Macro component selezionati

	Codice dei macro-componenti	Materiale degli strati	Spessore [mm] Densità [kg/m ²]	Trasmittanza U- [W/m ² .K]	K _m [J/m ² .K]
Copertura					
	B1020.20 Rivestimento di copertura	Soletta in cls	30 mm	0.37 ^(*)	13435
		Soletta in XPS	30 mm		
		Intercapedine di aria	30 mm		
		Membrana impermeabilizzante	1.63 kg/m ²		
		XPS	0 mm		
		Massetto in cls	40 mm		
	B1020.10 Solaio di copertura parte portante	Pannello OSB	18 mm		
		Intercapedine di aria	80 mm		
		Pannello in lana di roccia	120 mm		
		Profilo in acciaio leggero	17 kg/m ²		
		Pannello in cartongesso	15 mm		
	C2050 Finitura del soffitto	Pittura	0.125 kg/m ²		
Solaio di piano					
	C2030 Pavimento	Piastrelle in ceramic	31 kg/m ²	-	61062
		Massetto in cls	13 mm		
	B1010.10 Solaio di piano parte portante	Pannello OSB	18 mm		
		Intercapedine di aria	160 mm		
	Pannello in lana di roccia	40 mm			

	Codice dei macro-componenti	Materiale degli strati	Spessore [mm] Densità [kg/m ²]	Trasmittanza U- [W/m ² .K]	K _m [J/m ² .K]
	B1010.10	Profilo in acciaio leggero	14 kg/m ²	-	61062
		Pannello in cartongesso	15 mm		
	C2050 Finitura del soffitto	Pittura	0.125 kg/m ²		
Solaio del piano terra					
	C2030 Pavimento	Piastrelle in ceramica	31 kg/m ²	0.599	65957
		Massetto in cls	13 mm		
	B1010.10 Solaio del piano terra parte portante	Soletta prefabbricata in cls	180 mm		
		XPS	40 mm		
Parete esterna					
	B2010.10 Impiallacciatura della parete esterna	ETICS	13.8 kg/m ²	0.29 ^(*)	13391
	B2010.20 Parete esterna	OSB	13 mm		
		Pannello in lana di roccia	120 mm		
		Profili in acciaio leggero	15 kg/m ²		
	Pannelli in cartongesso	15 mm			
	C2010 Finitura della parete esterna	Pittura	0.125 kg/m ²		

	Codice dei macro-componenti	Materiale degli strati	Spessore [mm] Densità [kg/m ²]	Trasmittanza U- [W/m ² .K]	K _m [J/m ² .K]	
Parete interna						
C20	C20	C2010 Finitura della parete interna	Pittura	0.125 kg/m ²	-	26782
		C1010 Partizioni interne	Pannello in cartongesso	15 mm		
			Pannello in lana di roccia	60 mm		
			Profilo in acciaio leggero	10 kg/m ²		
			Pannelli in cartongesso	15 mm		
C10	C2010 Finitura della parete interna	Pittura	0.125 kg/m ²			

^(*) Valori corretti per i ponti termici

4.1.3 Applicazione dell'approccio ai macro-componenti

Le analisi ambientali sono state condotte considerando una vita utile di 50 anni, ed i macro-componenti riportati in Tabella 4.2.

I risultati delle analisi per ciascuna categoria di impatto sono mostrati nel diagramma in Figura 4.3, considerando i moduli definiti nella norma nello EN 15978. Da questo grafico, si deduce chiaramente che la fase di produzione del materiale (Moduli A1-A3) è quella che produce impatti maggiori in relazione a tutte le categorie considerate con un contributo superiore al 60%

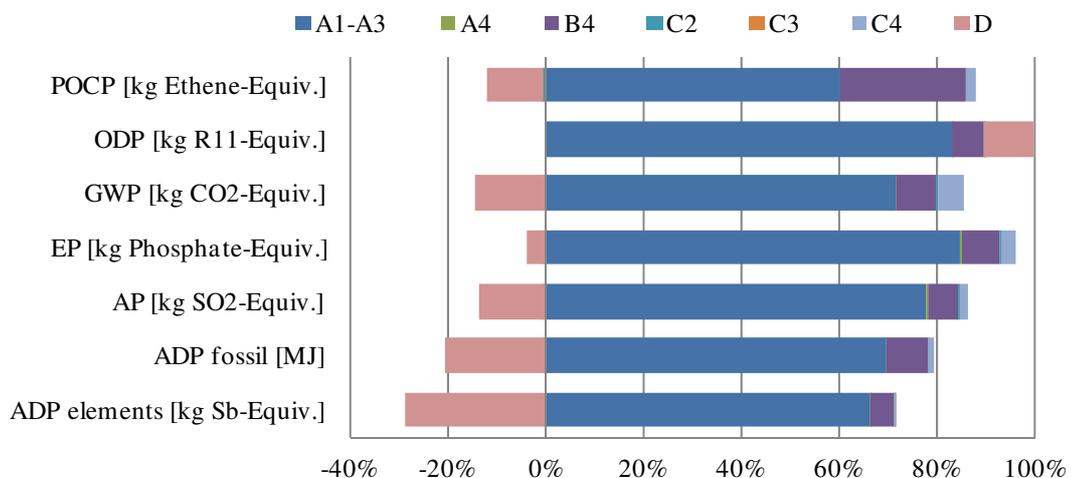


Fig. 4.3: Contributo di ogni modulo per le categorie di impatto

La fase d'uso (Modulo B4) e la fase di riciclo e riuso dei materiali (Modulo D) contribuiscono in maniera significativa alla produzione di impatti sulla maggior parte delle categorie prese in esame; seguono la fase della demolizione (Moduli C2-C4). Inoltre, dal grafico in Figura 4.3 si evince che valori negativi relativi al Modulo D, rappresentano i guadagni ambientali dovuti al riciclo e/o recupero dei materiali dopo la demolizione dell'edificio. I risultati sono stati sintetizzati in Tabella 4.3, per ciascuna delle categorie di impatto.

Tabella 4.3: Risultati dell'analisi degli impatti ambientali dell'edificio.

Categorie d'impatto	TOTAL
ADP per elementi [kg Sb-Equiv.]	1.11E-01
ADP fossile [MJ]	4.38E+05
AP [kg SO2-Equiv.]	1.35E+02
EP [kg Fosfato-Equiv.]	1.53E+01
GWP [kg CO2-Equiv.]	3.54E+04
ODP [kg R11-Equiv.]	1.00E-03
POCP [kg Ethene-Equiv.]	3.71E+01

4.1.4 Confronto con l'analisi degli impatti ambientali avanzata

Nel presente paragrafo, l'analisi degli impatti ambientali della residenza unifamiliare, oggetto di studio, sarà effettuata attraverso un approccio più avanzato. In particolare, lo studio è stato condotto con il software *GaBi 6* (2012) che colma le lacune dell'approccio per macro-componenti descritto in precedenza, poiché tiene conto anche delle fondazioni dell'edificio e della sua fase di costruzione (Modulo A5).

Le fondazioni dell'edificio sono in cemento armato e il primo impalcato è rialzato da terra ad una distanza di circa 50 cm. Durante la fase di fine vita, il cemento armato verrà riciclato considerando la stessa percentuale di riciclo.

La fase di costruzione (Modulo 5) tiene conto dei seguenti processi: (i) preparazione del terreno (scavo del suolo e trasporto in deposito) e), (ii) processo di costruzione (uso delle attrezzature da cantiere per il montaggio della struttura e di un carrello elevatore per il sollevamento dei pannelli strutturali); inoltre la durata dei lavori di costruzione dell'edificio è stata considerata pari ad un mese e mezzo. I risultati dell'analisi ambientale a ciclo di vita, condotta per tutte le fasi del ciclo di vita, sono riportati nel diagramma in Figura 4.4.

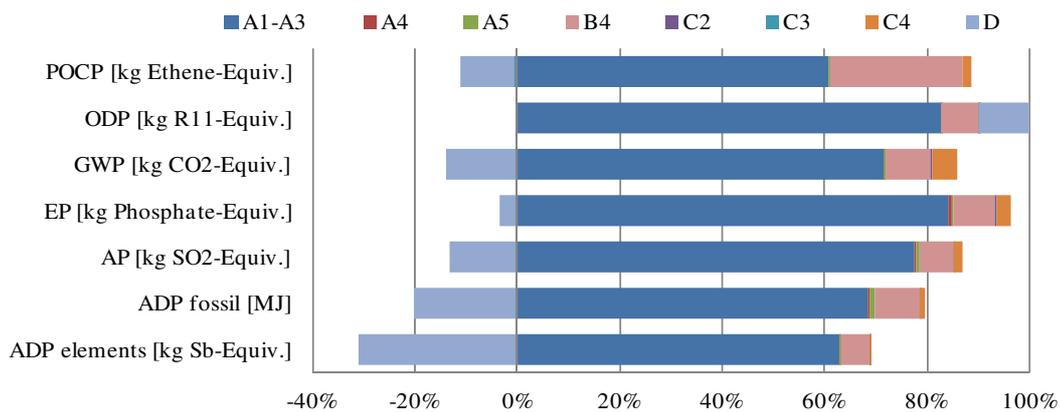


Fig. 4.4: Analisi degli impatti ambientali su tutto il ciclo di vita dell'edificio

Gli impatti ambientali prodotti nella fase di produzione dei materiali (Moduli A1-A3) risultano i più alti in relazione a tutte le categorie di impatto (più del 60%). La fase di costruzione (Moduli A4-A5) ha un impatto trascurabile, che varia tra lo 0% per le categorie di ODP, POCP e ADP_{elementi} e circa il 2.1% per la categoria ambientale ADP_{fossile}.

La fase d'uso (Modulo B4) e la fase di riciclo e recupero dei materiali (Modulo D) contribuiscono in maniera significativa in relazione alla maggior parte delle categorie di impatto, seguite dalla; segue la fase di demolizione (Moduli C2-C4). Queste conclusioni sono le stesse ottenute con il metodo semplificato, ma con limitazioni diverse. Infine, con riferimento all'approccio semplificato, si riporta l'errore relativo di ciascuna categoria di impatto di tutta l'analisi in Tabella 4.4.

Tabella 4.4: Errore (%) di ogni categoria di impatto prodotto dall'approccio per macro-componenti

ADP elementi	ADP fossile	AP	EP	GWP	ODP	POCP
0.0%	-2.4%	-1.3%	-1.3%	-1.3%	-0.1%	-0.5%

Per la maggior parte delle categorie di impatto l'errore risulta trascurabile; naturalmente, se si considerano altri sistemi costruttivi la fase di costruzione potrebbe assumere una maggiore rilevanza ai fini della valutazione degli impatti ambientali.

Alla luce di queste considerazioni, nonostante i limiti legati all'approccio per macro-componenti, i risultati ottenuti dalla metodologia proposta sono coerenti con i risultati ottenuti attraverso l'analisi degli impatti ambientali più dettagliata.

4.2 Validazione dell'approccio per il calcolo del fabbisogno energetico

La validazione del metodo adottato per il calcolo del fabbisogno energetico è stata effettuata considerando lo stesso caso studio indagato per il metodo con macro-

componenti. In questo paragrafo, saranno descritti tutti i dati di ingresso e la procedura di calcolo e i risultati ottenuti dall'approccio adottato sono stati confrontati con quelli ricavati dall'analisi dinamica avanzata, condotta attraverso il software *DesignBuilder/EnergyPlus* (2012).

4.2.1 Dati climatici e proprietà termiche del terreno

L'edificio è situato a Coimbra, città appartenente alla regione climatica *Csb*, i cui valori mensili della temperatura esterna e della radiazione solare sono descritti nel grafico in Figura 4.5.

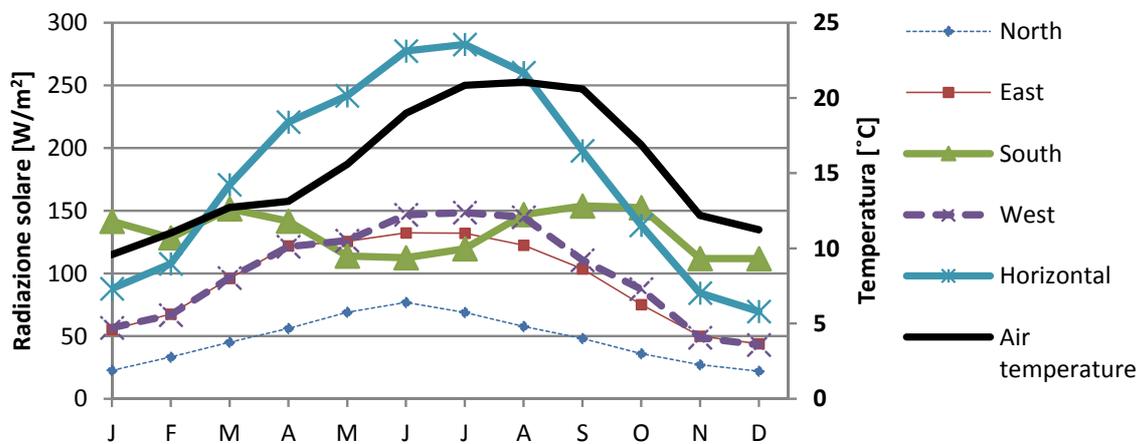


Fig. 4.5: Dati relativi alla condizione climatica di Coimbra: radiazione solare e temperature esterna

I valori delle proprietà termiche del terreno sono predefiniti e riportati in Tabella 3.10. Tabella 3.10

4.2.2 Dati relativi alla destinazione d'uso

I dati relativi alla destinazione d'uso e al flusso termico dovuto ai carichi interni (attività degli occupanti, elettrodomestici e illuminazione) sono stati ricavati dai valori predefiniti forniti dalla normativa ISO 13790 e da quelli precedentemente descritti nella Tabella 3.13. Le temperature ottimali sono comprese tra i 20°C (durante l'inverno) e i 25°C (durante l'estate).

4.2.3 Impianti dell'edificio

Le informazioni tecniche e i dati sugli impianti dell'edificio considerati (riscaldamento; raffrescamento/raffreddamento; ventilazione e produzione di acqua calda sanitaria, ACS), sono riportati in Tabella 4.5.

Tabella 4.5: Dati in ingresso degli impianti dell'edificio (valori predefiniti)

Impianti di servizio	Valori
Aria condizionata (Temperatura ideale 20°C – 25°C) ⁽¹⁾	COP Riscaldamento = 4.0 COP Raffreddamento = 3.0
Produzione di acqua calda ²	Efficienza: 0.9
Ventilazione + percentuale di infiltrazione ⁽³⁾ (Valore costante)	0.6 ac/h (Modalità Riscaldamento) 1.2 ac/h (Modalità raffrescamento)

(1) ISO13790 (2008) – Tabella G.12;

(2) in accord alla EN 15316-3-1 (2007);

(3) dipende dalla tenuta all'aria dell'involucro edilizio e dalle strategie di raffrescamento passivo.

4.2.4 Involucro vetrato e specifiche sull'uso dei sistemi di ombreggiamento

Le caratteristiche e le proprietà degli elementi-finestre, costituiti da doppio vetro e telaio in PVC, sono riportati in Tabella 4.6.

Tabella 4.6: Proprietà ottiche e termiche delle finestre (vetro + telai)

Materiale	Tramittanza U [W/m ² .K]	SHGC
Telaio PVC e pannello doppio (8+6 mm, con con intercapedine 14 mm)	2.597	0.780

Le proprietà termiche dei dispositivi di ombreggiamento sono descritte in Tabella 4.7.

Tabella 4.7: Proprietà termiche e ottiche dei dispositivi di ombreggiamento

Dispositivo	Trasmittanza solare	Riflettenza solare	R [m ² .K/W]	g_{gl+sh}
Oscuranti	0.02	0.80	0.260*	0,04**

*oscurante e intercapedine incluso (ISO 10077, 2006); **EN 13363-1, 2007.

4.2.5 Involucro opaco

Le caratteristiche e le proprietà degli elementi opachi della facciata sono quelle considerate per i macro-componenti (Tabella 4.2).

Il colore dell'involucro esterno dell'edificio influisce sugli apporti termici solari; è stato osservato, infatti, che l'edificio con un colore chiaro ha un coefficiente di assorbimento pari a 0.4.

4.2.6 Risultati della performance energetica dell'edificio

Il fabbisogno energetico annuo, calcolato con l'algoritmo mensile, è pari rispettivamente a 651.3 kWh/anno per il riscaldamento e 2195.0 kWh/anno per il raffrescamento., perciò

il fabbisogno energetico annuo complessivo . per il riscaldamento e il raffrescamento, risulta pari a 2846.3 kWh/anno (23.0 kWh/m²), mentre l'energia per la produzione di ACS è pari a 2642 kWh (21.3 kWh/m²).

Si riporta nel grafico in Figura 4.6 l'energia necessaria ogni mese per il riscaldamento e il raffrescamento.

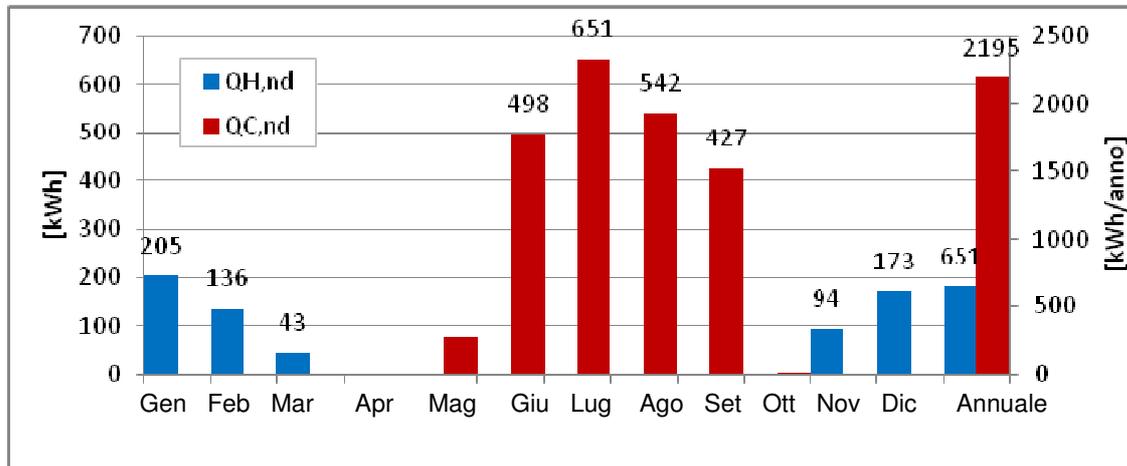


Fig. 4.6: Fabbisogno energetico per il riscaldamento e il raffreddamento degli ambienti (sulla base dell'algoritmo mensile)

4.2.7 Confronto con la simulazione numerica avanzata

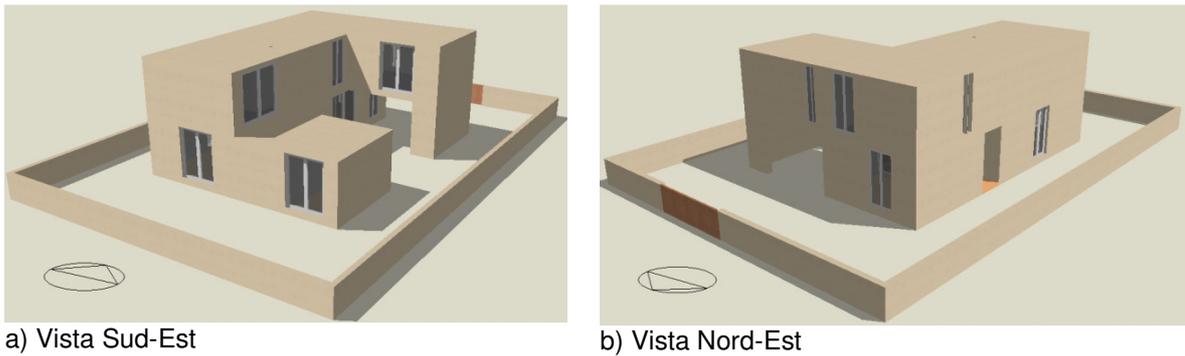
Un confronto tra i risultati ottenuti dall'algoritmo mensile e quelli ricavati dalle simulazioni dinamiche avanzate permette di valutare l'accuratezza dei risultati ricavati in precedenza.

4.2.7.1 Modello per la simulazione dinamica

La simulazione dinamica del comportamento termico dell'edificio è stata condotta con il software *DesignBuilder* (2012). La fonte dei dati climatici è la stessa considerata per l'approccio semplificato. Tuttavia, in questo caso, anziché usare i valori mensili della temperatura di bulbo asciutto e della radiazione solare, sono stati utilizzati i valori orari per tutti i parametri climatici.

La modellazione tridimensionale avanzata consente di simulare l'edificio da un punto di vista architettonico (Fig. 4.7). In particolare, il modello è stato costruito considerando dieci differenti zone climatiche, in corrispondenza delle partizioni interne all'edificio (Fig. 4.8):

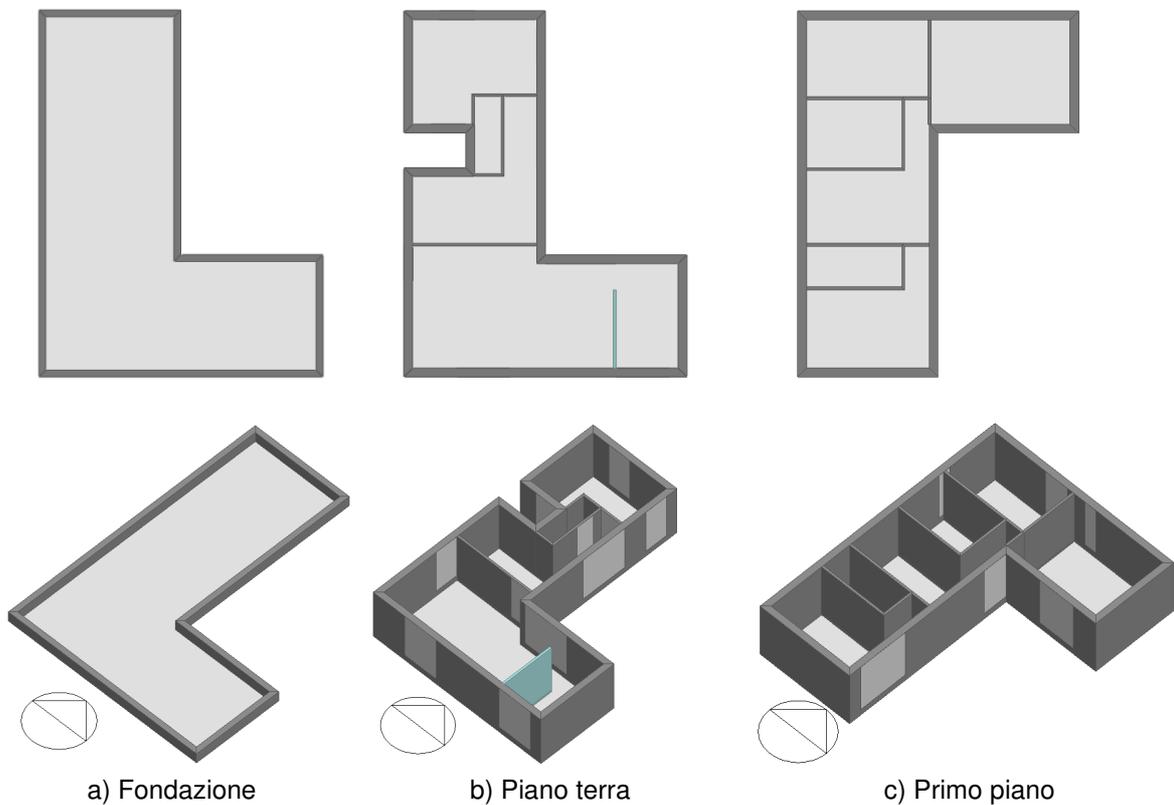
- (i) Il vespaio al piano seminterrato, modellato come ambiente non condizionato;
- (ii) Il piano terra, caratterizzato da tre zone termiche;
- (iii) Il primo piano, che presenta tre zone termiche;
- (iv) L'area comune ad entrambi i piani, che include i disimpegni e il vani vani scala.



a) Vista Sud-Est

b) Vista Nord-Est

Fig. 4.7: Viste prospettive del modello



a) Fondazione

b) Piano terra

c) Primo piano

Fig. 4.8: Configurazione tridimensionale dei piani

Gli elementi costruttivi considerati nel modello sono gli stessi di quelli descritti per l'approccio per macro-componenti (Tabella 4.2 per i componenti opachi, Tabella 4.6 per i componenti vetrati e Tabella 4.7 per i dispositivi di ombreggiamento). Analogamente, la stessa strategia è stata utilizzata per il controllo degli oscuranti delle finestre. Inoltre, i dati degli occupanti, la ventilazione e la percentuale di infiltrazione, l'efficienza e i dati relativi al sistema di aria condizionata sono gli stessi considerati nell'analisi precedente. Il confronto grafico tra il fabbisogno energetico mensile e annuale, per il riscaldamento e il

raffrescamento, calcolato attraverso i due approcci, è descritto nel grafico in Figura 4.9. L'energia necessaria ogni anno, per il riscaldamento e il raffrescamento, ricavata dalle simulazioni dinamiche, è rispettivamente pari a 932.4 kWh e 2133.3 kWh, per un totale di 3065.7 kWh all'anno (ovvero 24.8 kWh/m²).

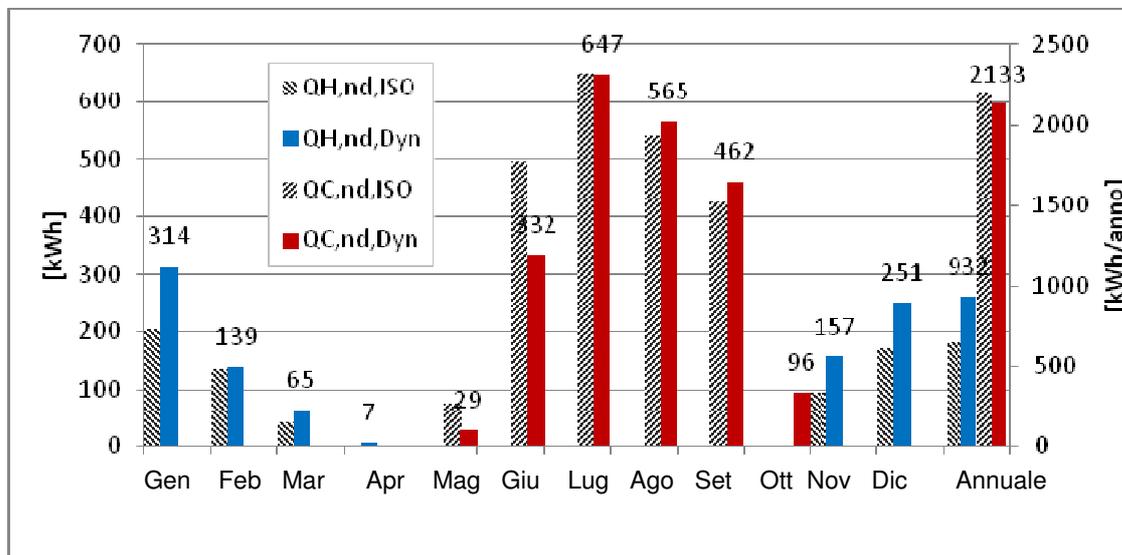


Fig. 4.9: Fabbisogno energetico dell'edificio per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti: confronto tra la simulazione dinamica (Dyn) e l'algoritmo mensile (ISO)

Come si osserva nel grafico di Figura 4.9, il fabbisogno energetico calcolato con l'approccio semplificato (metodo mensile) mostra una buona corrispondenza con i risultati ottenuti dalle analisi dinamiche. Quando si confronta l'energia totale richiesta (riscaldamento e raffrescamento) nella fase sviluppata (2846.3 kWh/year) con l'analisi dinamica, l'errore è pari a -7.2%.

4.3 CONCLUSIONI

I due approcci semplificati, descritti in questo volume, possono sostituire metodologie di analisi complesse come la valutazione LCA rigorosa per le quali, in genere, si richiede la presenza di esperti del settore.

Tali metodologie sono state validate attraverso il confronto con analisi avanzate, condotte con il software *GaBi 6* (2012) per la valutazione degli impatti ambientali e il software *DesignBuilder* (2012) per la quantificazione del fabbisogno energetico.

In conclusione i due approcci metodologici presentati sono molto accurati e consentono di svolgere le analisi ambientali in tempi ridotti.

BIBLIOGRAFIA

- Blendspace <https://www.blendspace.com/lessons/hMYwDSTKeg6ssQ/essential-question-how-can-i-protect-this-environment> (last accessed in 2013).
- CPA, 2012. Construction Product Association “A guide to understanding the embodied impacts of construction products” [ISBN 978-0-9567726-6-4]
- DesignBuilder software v3.0.0.105, www.designbuilder.co.uk/, 2012
- EERE-USDoE, Energy Efficiency and Renewable Energy Website from the United States Department of Energy: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data2.cfm/region=6_europe_wmo_region_6 (last accessed March 2014)
- EN 13363-1. (2007). Solar protection devices combined with glazing - Part 1: Simplified method. CEN - European Committee for Standardization.
- EN 15193, (2007) Thermal performance of buildings - Energy requirements for lighting, CEN – European Committee for Standardization.
- EN 15265, (2007) Energy performance of buildings - Calculation of energy needs for space heating and cooling using dynamic methods - General criteria and validation procedures. CEN - European Committee for Standardization.
- EN 15316-3-1, (2007) Heating systems in buildings – Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies – Part 3.1 Domestic hot water systems, characterisation of needs (tapping requirements), CEN – European committee for Standardization.
- EN 15643-1. 2010. Sustainability of construction works — Sustainability assessment of buildings — Part 1: General framework. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 15804. 2012. Sustainability of Construction Works — Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 15978. 2011. Sustainability of Construction Works — Assessment of environmental performance of buildings — Calculation method. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN ISO 13786, (2007) Thermal performance of building components - Dynamic thermal characteristics - Calculation methods, CEN – European Committee for Standardization.
- EN ISO 6946, (2007) Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method, CEN – European Committee for Standardization.
- EPA. U.S. Environmental protection Agency. Climate change. (<http://www.epa.gov/climatechange/>) (last accessed in 19/09/2009).

EPD.http://www.epd.gov.hk/epd/english/environmentinhk/air/prob_solutions/images/smog_cause_eng.jpg

Forsberg, A., von Malmborg F. 2004. Tools for environmental assessment of the built environment. In: *Building and Environment*, 39, pp. 223-228.

GaBi 6 (2012). Software-System and Databases for Life Cycle Engineering. Version 5.56. PE International AG, Leinfelden-Echterdingen, Germany

GaBi databases 2006. PE INTERNATIONAL GmbH; LBP-GaBi, University of Stuttgart: GaBi Software System, Leinfelden-Echterdingen / Germany, 2009.

Gervásio, H., Martins, R., Santos, P., Simões da Silva, L., “A macro-component approach for the assessment of building sustainability in early stages of design”, *Building and Environment* 73 (2014), pp. 256-270, DOI information: 10.1016/j.buildenv.2013.12.015.

Google Earth Software Website: www.google.co.uk/intl/en_uk/earth/ (last accessed January 2014).

Gorgolewski, M. (2007) Developing a simplified method of calculating U-values in light steel framing. *Building and Environment*, 42(1), 230–236.

Guinée, J.B.; Gorrée, M.; Heijungs, R.; Huppes, G.; Kleijn, R.; Koning, A. de; Oers, L. van; Wegener Sleeswijk, A.; Suh, S.; Udo de Haes, H.A.; Bruijn, H. de; Duin, R. van; Huijbregts, M.A.J. Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. IIa: Guide. IIb: Operational annex. III: Scientific background. Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-0228-9, Dordrecht, 2002, 692 pp.

Heijungs. R., Guinée. J., Huppes. G., Lankreijer. R., Udo de Haes. H., Sleeswijk. A., Ansems. A., Egges. P., van Duin. R. and de Goede. H. 1992. Environmental Life Cycle Assessment of products. Guide and Backgrounds. CML. Leiden University. Leiden

Howard N, Edwards S and Anderson J. 1999. Methodology for environmental profiles of construction materials, components and buildings. BRE Report BR 370. Watford. (<http://www.bre.co.uk/service.jsp?id=52>)

Huijbregts. M. 2001. Uncertainty and variability in environmental life-cycle assessment. PhD. Thesis. University of Amsterdam. The Netherlands.

IEA. 2001. LCA methods for buildings. Annex 31 – Energy-related environmental impact of buildings. International Energy Agency.

IPCC. 2007. Fourth Assessment Report – Climate Change 2007. IPCC, Geneva, Switzerland

ISO 10077, (2006) Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Part 1: General, ISO - International Organization for Standardization.

ISO 13370, (2007) Thermal performance of buildings - Heat transfer via the ground - Calculation methods, ISO - International Organization for Standardization.

ISO 13789, (2007) Thermal performance of buildings - Transmission and ventilation heat transfer coefficients - Calculation method, ISO - International Organization for Standardization.

ISO 13790, (2008) Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling, CEN – European committee for Standardization.

ISO 14025. 2006. Environmental labels and declarations - Type III environmental declarations - Principles and procedures

ISO 14040. 2006. Environmental management – life cycle assessment – Principles and framework. International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland.

ISO 14044. 2006. Environmental management – life cycle assessment – Requirements and guidelines. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

Jönsson Å. 2000. Tools and methods for environmental assessment of building products - methodological analysis of six selected approaches. In: Building and Environment, 35, pp. 223-238.

Kellenberger D. 2005. Comparison and benchmarking of LCA-based building related environmental assessment and design tools. EMPA Dübendorf, Technology and Society Laboratory, LCA group.

Kortman J, van Eijwik H, Mark J, Anink D, Knapen M. 1998. Presentation of tests by architects of the LCA-based computer tool EcoQuantum domestic. Proceedings of Green Building Challenge 1998. Vancouver. Canada (<http://www.ivambv.uva.nl/uk/producten/product7.htm>)

Kottek M, Grieser J, Beck C, Rudolf B and Rubel F (2006) World map of Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3): 259–263.

LCI, 2001. World Steel Life Cycle Inventory. Methodology report 1999/2000. International Iron and Steel Institute. Committee on Environmental Affairs, Brussels.

Lippiatt, B. 2002. Building for environmental and economical sustainability. Technical manual and user guide (BEES 3.0). National Institute of Standards and Technology (NIST). Report NISTIR 6916. (<http://www.bfrl.nist.gov/oea/software/bees.html>).

RCCTE (2006) Portuguese code of practice for thermal behaviour and energy efficiency of residential buildings. Decreto-Lei n.80/2006. Regulamento das Características Térmicas dos Edifícios (in Portuguese:). Lisboa, Portugal: Diário da República.

Reijnders L., van Roekel A. 1999. Comprehensiveness and adequacy of tools for the environmental improvement of buildings. In: Journal of Cleaner Production, 7, pp. 221-225.

Santos P., Gervásio H., Simões da Silva L., & Gameiro A. (2011). Influence of climate

change on the energy efficiency of light-weight steel residential buildings. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 28, 325–352.

Santos P., Simões da Silva L., & Ungureanu V. 2012. *Energy Efficiency of Light-weight Steel-framed Buildings*. European Convention for Constructional Steelwork (ECCS), Technical Committee 14 - Sustainability & Eco-Efficiency of Steel Construction, ISBN 978-92-9147-105-8, N. 129, 1st edition.

SB_Steel, 2014. Sustainable Building Project in Steel. Draft final report. RFSR-CT-2010-00027. Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel

Steel Recycling Institute. <http://www.recycle-steel.org/construction.html> (last accessed in 31/08/2009)

The energy library. <http://theenergylibrary.com/node/324>

Trusty WB, Associates. 1997. Research guidelines. ATHENATM Sustainable Materials Institute. Merrickville. Canada. (<http://www.athenasmi.ca/about/lcaModel.html>)

UNEP, 2004. Why take a life cycle approach? United Nations Publication. ISBN: 92-807-24500-9

UniFormat™: A Uniform Classification of Construction Systems and Assemblies (2010). The Construction Specification Institute (CSI), Alexandria, VA, and Construction Specifications Canada (CSC), Toronto, Ontario. ISBN 978-0-9845357-1-2.

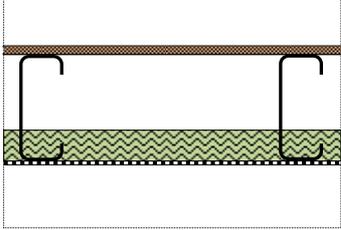
Werner, F. 2005. Ambiguities in decision-oriented life cycle inventories – The role of mental models and values. Doi 10.1007/1-4020-3254-4. Springer Netherlands

Wikipedia, 2013a. http://en.wikipedia.org/wiki/Marine_pollution

Wikipedia, 2013b. http://en.wikipedia.org/wiki/Natural_resource

Worldsteel organization. <http://www.worldsteel.org/index.php> (last accessed in 31/08/2009)

APPENDE 1 – DATABASE DEI MACRO-COMPONENTI

B1010.10 Solaio di piano					
B1010.10.1a	Materiali	Spessore/ densità	Scenario di fine vita	Riciclo (%)	
	Pannello OSB (mm)	18	Incenerimento	80	
	Intercapedine d'aria (mm)	160			
	Pannello in lana di roccia (mm)	40	Riciclo	80	
	Pannello in cartongesso (mm)	15	Riciclo	80	
	Profilo in acciaio leggero (kg/m ²)	14	Riciclo	90	
B1010.10.1a – LCA					
	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	2,83E-05	1,76E-09	1,54E-09	3,37E-08	-1,96E-04
ADP fossil [MJ]	5,48E+02	6,54E-01	5,72E-01	1,31E+00	-3,35E+02
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	1,70E-01	2,11E-04	1,83E-04	5,74E-04	-4,45E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	1,41E-02	4,86E-05	4,20E-05	8,79E-05	-1,01E-03
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	5,12E+01	4,71E-02	4,12E-02	3,86E-01	-1,46E+01
ODP [kg R11-Equiv.]	7,65E-07	8,25E-13	7,21E-13	7,21E-11	1,76E-07
POCP [kg Ethene-Equiv.]	2,53E-02	-6,89E-05	-5,95E-05	1,49E-04	-1,07E-02

Unità funzionale:

1 m² di solaio di un edificio, progettato per una vita utile di 50 anni, con una trasmittanza termica (U) pari a 0.92 W/m².K e inerzia termica (κ_m) pari a 61060 J/m².K.

Informazioni aggiuntive:**Elenco dei dati usati nei Moduli A1-A3**

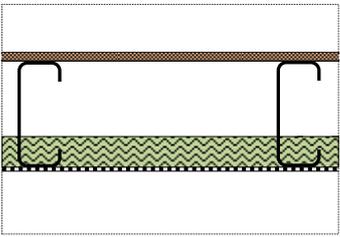
Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Pannello OSB	PE International	Germania	2008
Pannello in cartongesso	PE International	Europa	2008
Profili in acciaio leggero	Worldsteel	Mondo	2007
Lana di roccia	PE International	Europa	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli A4 e C2 (ipotizzando una distanza di 20 km)

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Trasporto con il camion	PE International	Mondo	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli C4-D

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Incenerimento del pannello OSB	PE International	Germania	2008
Smaltimento in discarica dei materiali inerti	PE International	Germania	2011
Riciclo dell'acciaio	Worldsteel	Mondo	2007

B1010.10 Solaio di piano					
B1010.10.1b	Materiali	Spessore/ densità	Scenario di fine vita	RR (%)	
	Pannello OSB (mm)	18	Incenerimento	80	
	Intercapedine d'aria (mm)	160			
	Pannello in lana di roccia (mm)	40	Riciclo	80	
	Pannello in cartongesso (mm)	15	Riciclo	80	
	Profilo in acciaio leggero (kg/m ²)	14	Riciclo	90	
B1010.10.1b – LCA					
	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	2,75E-05	1,53E-09	1,34E-09	3,80E-08	-1,96E-04
ADP fossil [MJ]	5,36E+02	5,70E-01	5,00E-01	1,37E+00	-3,57E+02
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	1,30E-01	1,84E-04	1,60E-04	6,24E-04	-5,26E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	9,54E-03	4,24E-05	3,68E-05	1,00E-04	-1,48E-03
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	4,68E+01	4,11E-02	3,60E-02	2,48E+00	-1,63E+01
ODP [kg R11-Equiv.]	8,21E-07	7,19E-13	6,31E-13	6,98E-11	1,76E-07
POCP [kg Ethene-Equiv.]	3,55E-02	-6,01E-05	-5,20E-05	1,42E-04	-1,12E-02

Unità funzionale:

1 m² di solaio di un edificio, progettato per una vita utile di 50 anni, con una trasmittanza termica (U) pari a 0.92 W/m².K e inerzia termica (κ_m) pari a 61060 J/m².K.

Informazioni aggiuntive:**Elenco dei dati usati nei Moduli A1-A3**

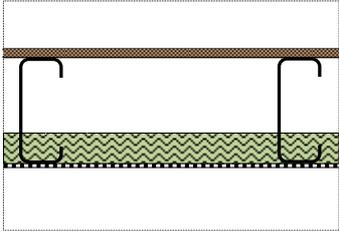
Processo – LCA	Data source	Geographical coverage	Anno
Pannello OSB	PE International	Germania	2008
Pannello in cartongesso	PE International	Europa	2008
Profili in acciaio leggero	Worldsteel	Mondo	2007
Pannello EPS	PE International	Europa	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli A4 e C2 (ipotizzando una distanza di 20 km)

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Trasporto con il camion	PE International	Mondo	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli C4-D

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Incenerimento del pannello OSB	PE International	Germania	2008
Incenerimento del pannello EPS	PE International	Europa	2011
Smaltimento in discarica dei materiali inerti	PE International	Germania	2011
Riciclo dell'acciaio	Worldsteel	Mondod	2007

B1010.10 Solaio di piano					
B1010.10.1c	Materiali	Spessore/ densità	Scenario di fine vita	Riciclo (%)	
	Pannello OSB (mm)	18	Incenerimento	80	
	Intercapedine d'aria (mm)	160			
	Pannello XPS (mm)	40	Incenerimento	80	
	Pannello in cartongesso (mm)	15	Riciclo	80	
	Profilo in acciaio leggero (kg/m ²)	14	Riciclo	90	
B1010.10.1c - LCA					
	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	2,81E-05	1,56E-09	1,37E-09	4,42E-08	-1,96E-04
ADP fossil [MJ]	5,75E+02	5,78E-01	5,07E-01	1,54E+00	-3,70E+02
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	1,33E-01	1,87E-04	1,62E-04	7,16E-04	-5,74E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	9,73E-03	4,30E-05	3,73E-05	1,17E-04	-1,77E-03
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	4,79E+01	4,16E-02	3,65E-02	3,78E+00	-1,72E+01
ODP [kg R11-Equiv.]	7,64E-07	7,29E-13	6,40E-13	7,61E-11	1,75E-07
POCP [kg Ethene-Equiv.]	2,49E-02	-6,09E-05	-5,28E-05	1,54E-04	-1,15E-02

Unità funzionale:

1 m² di solaio di un edificio, progettato per una vita utile di 50 anni, con una trasmittanza termica (U) pari a 0.92 W/m².K e inerzia termica (κ_m) pari a 61060 J/m².K.

Informazioni aggiuntive:

Elenco dei dati usati nei Moduli A1-A3

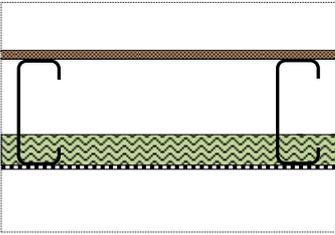
Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Pannello OSB	PE International	Germania	2008
Pannello in cartongesso	PE International	Europa	2008
Profili in acciaio leggero	Worldsteel	Mondo	2007
Pannello XPS	PE International	Germania	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli A4 e C2 (ipotizzando una distanza di 20 km)

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Trasporto con il camion	PE International	Mondo	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli C4-D

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Incenerimento del pannello OSB	PE International	Germania	2008
Incenerimento del pannello XPS	PE International	Europa	2011
Smaltimento in discarica dei materiali inerti	PE International	Germania	2011
Riciclo dell'acciaio	Worldsteel	Mondod	2007

B1010.10 Solaio di piano					
B1010.10.1d	Materiali	Spessore/ densità	Scenario di fine vita	Riciclo (%)	
	Pannello OSB (mm)	18	Incenerimento	80	
	Intercapedine d'aria (mm)	160			
	Pannello in PUR (mm)	40	Incenerimento	80	
	Pannello in cartongesso (mm)	15	Riciclo	80	
	Profilo in acciaio leggero (kg/m2)	14	Riciclo	90	
B1010.10.1d - LCA					
	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	4,65E-05	1,56E-09	1,37E-09	4,48E-08	-1,96E-04
ADP fossil [MJ]	6,19E+02	5,78E-01	5,07E-01	1,76E+00	-3,57E+02
AP [kg SO2-Equiv.]	1,37E-01	1,87E-04	1,62E-04	1,43E-03	-5,26E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	1,09E-02	4,30E-05	3,73E-05	3,06E-04	-1,48E-03
GWP [kg CO2-Equiv.]	5,18E+01	4,16E-02	3,65E-02	2,59E+00	-1,63E+01
ODP [kg R11-Equiv.]	7,65E-07	7,29E-13	6,40E-13	8,46E-11	1,76E-07
POCP [kg Ethene-Equiv.]	2,37E-02	-6,09E-05	-5,28E-05	1,90E-04	-1,12E-02

Unità funzionale:

1 m² di solaio di un edificio, progettato per una vita utile di 50 anni, con una trasmittanza termica (U) pari a 0.92 W/m².K e inerzia termica (κ_m) pari a 61060 J/m².K.

Informazioni aggiuntive:

Elenco dei dati usati nei Moduli A1-A3

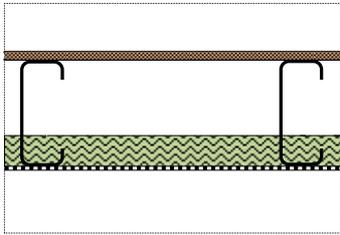
Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Pannello OSB	PE International	Germania	2008
Pannello in cartongesso	PE International	Europa	2008
Profili in acciaio leggero	Worldsteel	Mondo	2007
Pannello in PUR	PE International	Germania	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli A4 e C2 (ipotizzando una distanza di 20 km)

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Trasporto con il camion	PE International	Mondo	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli C4-D

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Incenerimento del pannello OSB	PE International	Germany	2008
Incenerimento del pannello PUR	PE International	Europe	2011
Smaltimento in discarica dei materiali inerti	PE International	Germany	2011
Riciclo dell'acciaio	Worldsteel	World	2007

B1010.10 Solaio di piano					
B1010.10.1e	Materiali	Spessore/ densità	Scenario di fine vita	Riciclo (%)	
	Pannello OSB (mm)	18	Incenerimento	80	
	Intercapedine d'aria (mm)	160			
	Pannello in pannello in sughero (mm)	40	Riciclo	80	
	Pannello in cartongesso (mm)	15	Riciclo	80	
	Profilo in acciaio leggero (kg/m ²)	14	Riciclo	90	
B1010.10.1e - LCA					
	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	2,72E-05	1,64E-09	1,43E-09	3,09E-08	-1,96E-04
ADP fossil [MJ]	5,04E+02	6,09E-01	5,32E-01	1,21E+00	-3,35E+02
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	1,35E-01	1,97E-04	1,70E-04	5,26E-04	-4,45E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	1,13E-02	4,53E-05	3,91E-05	8,06E-05	-1,01E-03
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	4,75E+01	4,38E-02	3,83E-02	3,54E-01	-1,46E+01
ODP [kg R11-Equiv.]	7,64E-07	7,68E-13	6,71E-13	6,61E-11	1,76E-07
POCP [kg Ethene-Equiv.]	2,27E-02	-6,42E-05	-5,54E-05	1,37E-04	-1,07E-02

Unità funzionale:

1 m² di solaio di un edificio, progettato per una vita utile di 50 anni, con una trasmittanza termica (U) pari a 0.92 W/m².K e inerzia termica (κ_m) pari a 61060 J/m².K.

Informazioni aggiuntive:

Elenco dei dati usati nei Moduli A1-A3

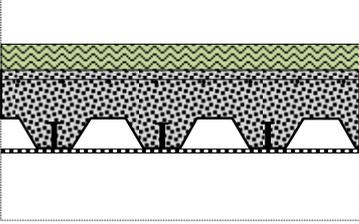
Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Pannello OSB	PE International	Germania	2008
Pannello in cartongesso	PE International	Europa	2008
Profili in acciaio leggero	Worldsteel	Mondo	2007
Pannello in sughero	PE International	Germania	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli A4 e C2 (ipotizzando una distanza di 20 km)

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Trasporto con il camion	PE International	Mondo	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli C4-D

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Incenerimento del pannello OSB	PE International	Germany	2008
Smaltimento in discarica dei materiali inerti	PE International	Germany	2011
Riciclo dell'acciaio	Worldsteel	World	2007

B1010.10 Parte portante del solaio					
B1010.10.2a	Materiali	Spessore/ densità	Scenario di fine vita	Riciclo (%)	
	Pannello PE (mm)	20	Incenerimento	80	
	Calcestruzzo (kg/m ²)	410	Riciclo	70	
	Armatura (kg/m ²)	8.24	Riciclo	70	
	Lamiera (kg/m ²)	11.10	Riciclo	70	
	Pannelli in cartongesso (mm)	15	Riciclo	80	
	Struttura in acciaio (kg/m ²)	40	Riciclo	90	
B1010.10.2a - LCA					
	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	-4,61E-04	2,08E-08	1,81E-08	1,26E-06	-3,32E-04
ADP fossil [MJ]	1,56E+03	7,71E+00	6,74E+00	4,90E+01	-3,44E+02
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	3,93E-01	2,49E-03	2,16E-03	2,14E-02	-9,22E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	3,65E-02	5,73E-04	4,96E-04	3,28E-03	-2,77E-03
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	1,51E+02	5,56E-01	4,86E-01	1,58E+01	-3,67E+01
ODP [kg R11-Equiv.]	1,88E-06	9,73E-12	8,51E-12	2,68E-09	1,04E-06
POCP [kg Ethene-Equiv.]	6,27E-02	-8,13E-04	-7,01E-04	5,54E-03	-1,90E-02

Unità funzionale:

1 m² di solaio di un edificio, progettato per una vita utile di 50 anni, con una trasmittanza termica (U) pari a 0.92 W/m².K e inerzia termica (κ_m) pari a 61060 J/m².K.

Informazioni aggiuntive:

Elenco dei dati usati nei Moduli A1-A3

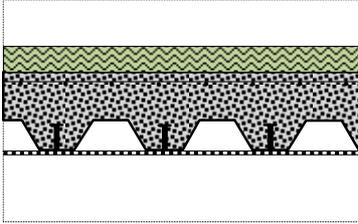
Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Calcestruzzo	PE International	Germania	2011
Barre per l'armatura	Worldsteel	Mondo	2007
Lamiera	Worldsteel	Mondo	2007
Acciaio strutturale	Worldsteel	Mondo	2007
Pannello in cartongesso	PE International	Europa	2008
PE	PE International	Germania	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli A4 e C2 (ipotizzando una distanza di 20 km)

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Transporto con il camion	PE International	Mondo	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli C4-D

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Incenerimento del pannello in PE	PE International	Europa	2011
Smaltimento in discarica dei materiali inerti	PE International	Germania	2011
Riciclo dell'acciaio	Worldsteel	Mondo	2007

B1010.10 Parte portante del solaio					
B1010.10.2b	Materiali	Spessore/ densità	Scenario di fine vita	Riciclo (%)	
	Pannello EPS (mm)	20	Incenerimento	80	
	Calcestruzzo (kg/m ²)	410	Riciclo	70	
	Armatura (kg/m ²)	8.24	Riciclo	70	
	Lamiera (kg/m ²)	11.10	Riciclo	70	
	Pannello in cartongesso (mm)	15	Riciclo	80	
	Struttura in acciaio (kg/m ²)	40	Riciclo	90	
B1010.10.2b - LCA					
	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	-4,62E-04	2,08E-08	1,81E-08	1,26E-06	-3,32E-04
ADP fossil [MJ]	1,54E+03	7,71E+00	6,74E+00	4,89E+01	-3,37E+02
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	3,92E-01	2,49E-03	2,16E-03	2,13E-02	-8,94E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	3,64E-02	5,73E-04	4,96E-04	3,27E-03	-2,61E-03
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	1,50E+02	5,55E-01	4,86E-01	1,54E+01	-3,62E+01
ODP [kg R11-Equiv.]	1,91E-06	9,73E-12	8,50E-12	2,68E-09	1,04E-06
POCP [kg Ethene-Equiv.]	6,92E-02	-8,13E-04	-7,01E-04	5,53E-03	-1,88E-02

Unità funzionale:

1 m² di solaio di un edificio, progettato per una vita utile di 50 anni, con una trasmittanza termica (U) pari a 0.92 W/m².K e inerzia termica (κ_m) pari a 61060 J/m².K.

Informazioni aggiuntive:**Elenco dei dati usati nei Moduli A1-A3**

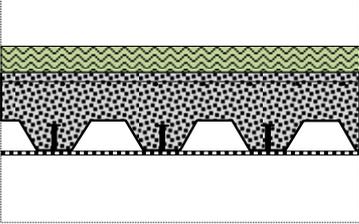
Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Concrete	PE International	Germania	2011
Barre per l'armatura	Worldsteel	Mondo	2007
Lamiera	Worldsteel	Mondo	2007
Acciaio strutturale	Worldsteel	Mondo	2007
Pannello in cartongesso	PE International	Europa	2008
EPS	PE International	Europa	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli A4 e C2 (ipotizzando una distanza di 20 km)

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Transporto con il camion	PE International	Mondo	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli C4-D

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Incenerimento del pannello EPS	PE International	Europa	2011
Smaltimento in discarica dei materiali inerti	PE International	Germania	2011
Riciclo dell'acciaio	Worldsteel	Mondo	2007

B1010.10 Parte portante del solaio					
B1010.10.2c	Materiali	Spessore/ densità	Scenario di fine vita	Riciclo (%)	
	Pannello XPS (mm)	20	Incenerimento	80	
	Calcestruzzo (kg/m ²)	410	Riciclo	70	
	Armatura (kg/m ²)	8.24	Riciclog	70	
	Lamiera (kg/m ²)	11.10	Riciclo	70	
	Pannello in cartongesso (mm)	15	Riciclo	80	
	Struttura in acciaio (kg/m ²)	40	Riciclo	90	
B1010.10.2c – LCA					
	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	-4,62E-04	2,08E-08	1,82E-08	1,26E-06	-3,32E-04
ADP fossil [MJ]	1,56E+03	7,71E+00	6,74E+00	4,90E+01	-3,43E+02
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	3,94E-01	2,49E-03	2,16E-03	2,14E-02	-9,19E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	3,65E-02	5,74E-04	4,96E-04	3,28E-03	-2,75E-03
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	1,51E+02	5,56E-01	4,86E-01	1,60E+01	-3,66E+01
ODP [kg R11-Equiv.]	1,88E-06	9,73E-12	8,51E-12	2,68E-09	1,04E-06
POCP [kg Ethene-Equiv.]	6,39E-02	-8,13E-04	-7,01E-04	5,54E-03	-1,89E-02

Unità funzionale:

1 m² di solaio di un edificio, progettato per una vita utile di 50 anni, con una trasmittanza termica (U) pari a 0.92 W/m².K e inerzia termica (κ_m) pari a 61060 J/m².K.

Informazioni aggiuntive:**Elenco dei dati usati nei Moduli A1-A3**

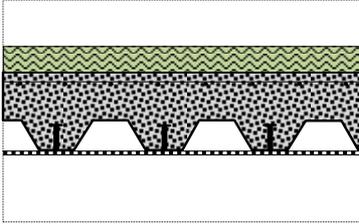
Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Calcestruzzo	PE International	Germania	2011
Barre per l'armatura	Worldsteel	Mondo	2007
Lamiere	Worldsteel	Mondo	2007
Acciaio strutturale	Worldsteel	Mondo	2007
Pannello in cartongesso	PE International	Europa	2008
Pannello in XPS	PE International	Germania	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli A4 and C2 (ipotizzando una distanza di 20 km)

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Transporto con il camion	PE International	Mondo	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli C4-D

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Incenerimento del pannello in XPS	PE International	Europa	2011
Smaltimento in discarica dei materiali inerti	PE International	Germania	2011
Riciclo dell'acciaio	Worldsteel	Mondo	2007

B1010.10 Solaio di piano					
B1010.10.2d	Materiali	Spessore/ densità	Scenario di fine vita	Riciclo (%)	
	Pannello in sughero(mm)	20	Riciclo	80	
	Calcestruzzo (kg/m ²)	410	Riciclo	70	
	Armatura (kg/m ²)	8.24	Riciclo	70	
	Lamiera (kg/m ²)	11.10	Riciclo	70	
	Pannello in cartongesso (mm)	15	Riciclo	80	
	Struttura in acciaio (kg/m ²)	40	Riciclo	90	
B1010.10.2d - LCA					
	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	-4,62E-04	2,08E-08	1,82E-08	1,25E-06	-3,32E-04
ADP fossil [MJ]	1,52E+03	7,73E+00	6,76E+00	4,88E+01	-3,26E+02
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	3,95E-01	2,50E-03	2,16E-03	2,13E-02	-8,54E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	3,73E-02	5,75E-04	4,97E-04	3,26E-03	-2,37E-03
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	1,51E+02	5,57E-01	4,87E-01	1,43E+01	-3,53E+01
ODP [kg R11-Equiv.]	1,88E-06	9,75E-12	8,53E-12	2,68E-09	1,04E-06
POCP [kg Ethene-Equiv.]	6,28E-02	-8,15E-04	-7,03E-04	5,53E-03	-1,86E-02

Unità funzionale:

1 m² di solaio di un edificio, progettato per una vita utile di 50 anni, con una trasmittanza termica (U) pari a 0.92 W/m².K e inerzia termica (κ_m) pari a 61060 J/m².K.

Informazioni aggiuntive:**Elenco dei dati usati nei Moduli A1-A3**

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Calcestruzzo	PE International	Germania	2011
Barre per l'armatura	Worldsteel	Mondo	2007
Lamiera	Worldsteel	Mondo	2007
Acciaio strutturale	Worldsteel	Mondo	2007
Pannello in cartongesso	PE International	Europa	2008
Sughero	PE International	Germania	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli A4 e C2 (ipotizzando una distanza di 20 km)

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Transporto con il camion	PE International	Mondo	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli C4-D

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Smaltimento in discarica dei materiali inerti	PE International	Germania	2011
Riciclo dell'acciaio	Worldsteel	Mondo	2007

B1010.10 Solaio di piano					
B1010.10.3a	Materiali	Spessore/ densità	Scenario di fine vita	Riciclo (%)	
	Pannello in PE (mm)	20	Incenerimento	80	
	Calcestruzzo (kg/m ²)	455.4	Riciclo	70	
	Armatura (kg/m ²)	21.17	Riciclo	70	
B1010.10.3a - LCA					
	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	-5,27E-05	2,07E-08	1,81E-08	1,36E-06	-1,09E-05
ADP fossil [MJ]	6,37E+02	7,68E+00	6,71E+00	5,31E+01	-4,99E+01
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	1,62E-01	2,48E-03	2,15E-03	2,32E-02	-1,80E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	2,12E-02	5,71E-04	4,94E-04	3,55E-03	-7,25E-04
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	7,42E+01	5,53E-01	4,84E-01	1,70E+01	-5,44E+00
ODP [kg R11-Equiv.]	2,64E-07	9,69E-12	8,47E-12	2,91E-09	3,61E-08
POCP [kg Ethene-Equiv.]	2,23E-02	-8,09E-04	-6,98E-04	6,00E-03	-2,31E-03

Unità funzionale:

1 m² di solaio di un edificio, progettato per una vita utile di 50 anni, con una trasmittanza termica (U) pari a 0.92 W/m².K e inerzia termica (κ_m) pari a 61060 J/m².K.

Informazioni aggiuntive:**Elenco dei dati usati nei Moduli A1-A3**

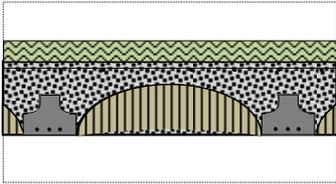
Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Calcestruzzo	PE International	Germania	2011
Barre per l'armatura	Worldsteel	Mondo	2007
Pannello PE	PE International	Germania	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli A4 e C2 (ipotizzando una distanza di 20 km)

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Transporto con il camion	PE International	Mondo	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli C4-D

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Smaltimento in discarica dei materiali inerti	PE International	Germania	2011
Riciclo dell'acciaio	Worldsteel	Mondo	2007
Incenerimento del pannello PE	PE International	Europa	2011

B1010.10 Solaio di piano					
B1010.10.3b	Materiali	Spessore/ densità	Scenario di fine vita	Riciclo (%)	
	Pannello in EPS (mm)	20	Incenerimento	80	
	Calcestruzzo(kg/m2)	455.4	Riciclo	70	
	Armatura (kg/m2)	21.17	Riciclo	70	
B1010.10.3b - LCA					
	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	-5,38E-05	2,07E-08	1,81E-08	1,36E-06	-1,09E-05
ADP fossil [MJ]	6,18E+02	7,68E+00	6,71E+00	5,30E+01	-4,24E+01
AP [kg SO2-Equiv.]	1,61E-01	2,48E-03	2,15E-03	2,31E-02	-1,52E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	2,11E-02	5,71E-04	4,93E-04	3,55E-03	-5,61E-04
GWP [kg CO2-Equiv.]	7,36E+01	5,53E-01	4,83E-01	1,66E+01	-4,87E+00
ODP [kg R11-Equiv.]	2,93E-07	9,68E-12	8,46E-12	2,90E-09	3,61E-08
POCP [kg Ethene-Equiv.]	2,87E-02	-8,09E-04	-6,98E-04	6,00E-03	-2,14E-03

Unità funzionale:

1 m² di solaio di un edificio, progettato per una vita utile di 50 anni, con una trasmittanza termica (U) pari a 0.92 W/m².K e inerzia termica (κ_m) pari a 61060 J/m².K.

Informazioni aggiuntive:**Elenco dei dati usati nei Moduli A1-A3**

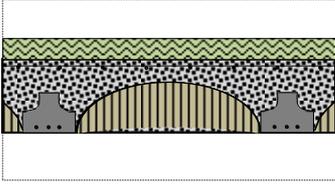
Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Calcestruzzo	PE International	Germania	2011
Barre di armatura	Worldsteel	Mondo	2007
Pannello in EPS	PE International	Europa	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli A4 e C2 (ipotizzando una distanza di 20 km)

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Transporto con il camion	PE International	Mondo	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli C4-D

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Smaltimento in discarica dei materiali inerti	PE International	Germania	2011
Riciclo dell'acciaio	Worldsteel	Mondo	2007
Incenerimento del pannello in EPS	PE International	Europa	2011

B1010.10 Solaio di piano					
B1010.10.3c	Materiali	Spessore/ densità	Scenario di fine vita	Riciclo (%)	
	Pannello in XPS (mm)	20	Incenerimento	80	
	Calcestruzzo (kg/m ²)	455.4	Riciclo	70	
	Armatura (kg/m ²)	21.17	Riciclo	70	
B1010.10.3c - LCA					
	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	-5,35E-05	2,07E-08	1,81E-08	1,36E-06	-1,09E-05
ADP fossil [MJ]	6,37E+02	7,68E+00	6,71E+00	5,31E+01	-4,89E+01
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	1,63E-01	2,48E-03	2,15E-03	2,32E-02	-1,77E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	2,12E-02	5,71E-04	4,94E-04	3,56E-03	-7,04E-04
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	7,42E+01	5,53E-01	4,84E-01	1,72E+01	-5,37E+00
ODP [kg R11-Equiv.]	2,64E-07	9,69E-12	8,47E-12	2,91E-09	3,61E-08
POCP [kg Ethene-Equiv.]	2,35E-02	-8,09E-04	-6,98E-04	6,01E-03	-2,28E-03

Unità funzionale:

1 m² di solaio di un edificio, progettato per una vita utile di 50 anni, con una trasmittanza termica (U) pari a 0.92 W/m².K e inerzia termica (κ_m) pari a 61060 J/m².K.

Informazioni aggiuntive:**Elenco dei dati usati nei Moduli A1-A3**

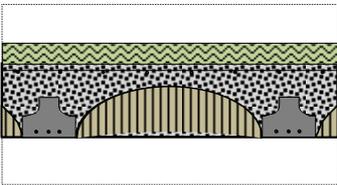
Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Calcestruzzo	PE International	Germania	2011
Barre di armatura	Worldsteel	Mondo	2007
Pannello in XPS	PE International	Europa	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli A4 e C2 (ipotizzando una distanza di 20 km)

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Transporto con il camion	PE International	Mondo	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli C4-D

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Smaltimento in discarica dei materiali inerti	PE International	Germania	2011
Riciclo dell'acciaio	Worldsteel	Mondo	2007
Incenerimento del pannello in XPS	PE International	Europa	2011

B1010.10 Solaio di piano					
B1010.10.3d	Materiali	Spessore/ densità	Scenario di fine vita	Riciclo (%)	
	Pannello in sughero(mm)	20	Riciclo	80	
	Calcestruzzo (kg/m ²)	455.4	Riciclo	70	
	Armatura (kg/m ²)	21.17	Riciclo	70	
B1010.10.3d - LCA					
	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	-5,40E-05	2,07E-08	1,83E-08	1,36E-06	-1,09E-05
ADP fossil [MJ]	6,02E+02	7,69E+00	6,80E+00	5,29E+01	-3,17E+01
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	1,64E-01	2,49E-03	2,18E-03	2,31E-02	-1,12E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	2,19E-02	5,72E-04	5,00E-04	3,54E-03	-3,22E-04
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	7,40E+01	5,54E-01	4,90E-01	1,55E+01	-4,05E+00
ODP [kg R11-Equiv.]	2,64E-07	9,71E-12	8,58E-12	2,90E-09	3,62E-08
POCP [kg Ethene-Equiv.]	2,24E-02	-8,11E-04	-7,07E-04	6,00E-03	-1,91E-03

Unità funzionale:

1 m² di solaio di un edificio, progettato per una vita utile di 50 anni, con una trasmittanza termica (U) pari a 0.92 W/m².K e inerzia termica (κ_m) pari a 61060 J/m².K.

Informazioni aggiuntive:**Elenco dei dati usati nei Moduli A1-A3**

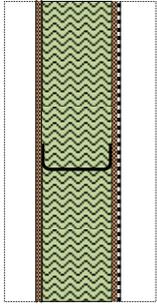
Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Calcestruzzo	PE International	Germania	2011
Barre di armatura	Worldsteel	Mondo	2007
Sughero	PE International	Germania	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli A4 e C2 (ipotizzando una distanza di 20 km)

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Transporto con il camion	PE International	Mondo	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli C4-D

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Smaltimento in discarica dei materiali inerti	PE International	Germania	2011
Riciclo dell'acciaio	Worldsteel	Mondo	2007

B2010.20 Parete esterna				
B2010.20.1a	Materiali	Spessore/ densità	Scenario di fine vita	Riciclo (%)
	Pannello OSB (mm)	13	Incenerimento	80
	Pannello in lana di roccia (mm)	120	Riciclo	80
	Pannello in cartongesso (mm)	15	Discarica	
	Profili in acciaio leggero (kg/m ²)	15	Riciclo	90

B1010.20.1a - LCA					
	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	3,06E-05	2,19E-09	1,92E-09	4,32E-08	-2,10E-04
ADP fossil [MJ]	7,09E+02	8,14E-01	7,12E-01	1,68E+00	-3,05E+02
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	2,65E-01	2,63E-04	2,28E-04	7,35E-04	-4,81E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	2,41E-02	6,05E-05	5,23E-05	1,13E-04	-1,17E-03
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	6,50E+01	5,86E-02	5,13E-02	4,94E-01	-1,73E+01
ODP [kg R11-Equiv.]	6,43E-07	1,03E-12	8,98E-13	9,24E-11	3,41E-07
POCP [kg Ethene-Equiv.]	3,27E-02	-8,58E-05	-7,40E-05	1,91E-04	-1,13E-02

Unità funzionale:

1 m² di solaio di un edificio, progettato per una vita utile di 50 anni, con una trasmittanza termica (U) pari a 0.92 W/m².K e inerzia termica (κ_m) pari a 61060 J/m².K.

Informazioni aggiuntive:

Elenco dei dati usati nei Moduli A1-A3

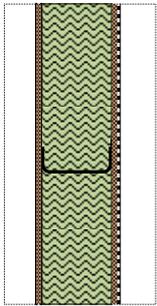
Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Pannello in OSB	PE International	Germania	2008
Pannello in cartongesso	PE International	Europa	2008
Profilo in acciaio leggero	Worldsteel	Mondo	2007
Pannello in lana di roccia	PE International	Europa	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli A4 e C2 (ipotizzando una distanza di 20 km)

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Transporto con il camion	PE International	Mondo	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli C4-D

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Incenerimento del pannello OSB	PE International	Germania	2008
Smaltimento in discarica dei materiali inerti	PE International	Germania	2011
Riciclo dell'acciaio	Worldsteel	Mondo	2007

B2010.20 Parete esterna					
B2010.20.1b	Materiali	Spessore/ densità	Scenario di fine vita	Riciclo (%)	
	Pannello OSB (mm)	13	Incenerimento	80	
	Pannello in EPS (mm)	120	Incenerimento	80	
	Pannello in cartongesso (mm)	15	Smaltimento		
	Profili in acciaio leggero (kg/m ²)	15	Riciclo	90	
B1010.20.1b - LCA					
	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	2,82E-05	1,93E-09	1,62E-09	5,61E-08	-2,10E-04
ADP fossil [MJ]	6,75E+02	7,18E-01	6,00E-01	1,84E+00	-3,70E+02
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	1,44E-01	2,32E-04	1,92E-04	8,87E-04	-7,24E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	1,03E-02	5,34E-05	4,41E-05	1,50E-04	-2,60E-03
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	5,18E+01	5,17E-02	4,33E-02	6,79E+00	-2,22E+01
ODP [kg R11-Equiv.]	8,13E-07	9,05E-13	7,57E-13	8,54E-11	3,41E-07
POCP [kg Ethene-Equiv.]	6,33E-02	-7,57E-05	-6,24E-05	1,70E-04	-1,27E-02

Unità funzionale:

1 m² di solaio di un edificio, progettato per una vita utile di 50 anni, con una trasmittanza termica (U) pari a 0.92 W/m².K e inerzia termica (κ_m) pari a 61060 J/m².K.

Informazioni aggiuntive:

Elenco dei dati usati nei Moduli A1-A3

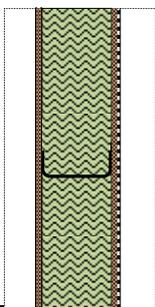
Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Pannello OSB	PE International	Germania	2008
Pannello in cartongesso	PE International	Europa	2008
Profilo in acciaio leggero	Worldsteel	Mondo	2007
Pannello in EPS	PE International	Europa	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli A4 e C2 (ipotizzando una distanza di 20 km)

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Transporto con il camion	PE International	Mondo	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli C4-D

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Incenerimento del pannello OSB	PE International	Germania	2008
Incenerimento del pannello EPS	PE International	Europa	2011
Smaltimento in discarica dei materiali inerti	PE International	Germania	2011
Riciclo dell'acciaio	Worldsteel	Mondo	2007

B2010.20 Parete esterna					
B2010.20.1c	Materiali	Spessore/ densità	Scenario di fine vita	Riciclo (%)	
	Pannello in OSB (mm)	13	Incenerimento	80	
	Pannello in XPS (mm)	120	Incineration	80	
	Pannello in cartongesso (mm)	15	Smaltimento		
	Profilo in acciaio leggero (kg/m2)	15	Reciclo	90	
B1010.20.1c – LCA					
	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	2,99E-05	2,24E-09	1,84E-09	7,46E-08	-2,10E-04
ADP fossil [MJ]	7,89E+02	8,33E-01	6,85E-01	2,36E+00	-4,08E+02
AP [kg SO2-Equiv.]	1,53E-01	2,69E-04	2,19E-04	1,16E-03	-8,70E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	1,09E-02	6,20E-05	5,04E-05	2,01E-04	-3,46E-03
GWP [kg CO2-Equiv.]	5,52E+01	6,00E-02	4,94E-02	1,07E+01	-2,52E+01
ODP [kg R11-Equiv.]	6,41E-07	1,05E-12	8,65E-13	1,04E-10	3,41E-07
POCP [kg Ethene-Equiv.]	3,16E-02	-8,79E-05	-7,13E-05	2,06E-04	-1,36E-02

Unità funzionale:

1 m² di solaio di un edificio, progettato per una vita utile di 50 anni, con una trasmittanza termica (U) pari a 0.92 W/m².K e inerzia termica (κ_m) pari a 61060 J/m².K

Informazioni aggiuntive:**Elenco dei dati usati nei Moduli A1-A3**

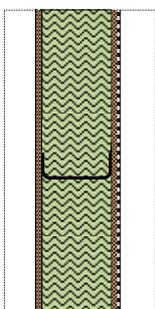
Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Pannello OSB	PE International	Germania	2008
Pannello in cartongesso	PE International	Europa	2008
Profilo in acciaio leggero	Worldsteel	Mondo	2007
Pannello in XPS	PE International	Germania	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli A4 e C2 (ipotizzando una distanza di 20 km)

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Transporto con il camion	PE International	Mondo	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli C4-D

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Incenerimento del pannello OSB	PE International	Germania	2008
Incenerimento del pannello in XPS	PE International	Europa	2011
Smaltimento in discarica dei materiali inerti	PE International	Germania	2011
Riciclo dell'acciaio	Worldsteel	Mondo	2007

B2010.20 Pannello esterno				
B2010.20.1d	Materiali	Spessore/ densità	Scenario di fine vita	Riciclo (%)
	Pannello OSB (mm)	13	Incenerimento	80
	Pannello in PUR (mm)	120	Incenerimento	80
	Pannello in cartongesso (mm)	15	Discarica	
	Profilo in acciaio leggero (kg/m ²)	15	Riciclo	90

B1010.20.1d- LCA					
	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	8,52E-05	2,24E-09	1,84E-09	7,64E-08	-2,10E-04
ADP fossil [MJ]	9,22E+02	8,33E-01	6,85E-01	3,02E+00	-3,70E+02
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	1,66E-01	2,69E-04	2,19E-04	3,30E-03	-7,23E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	1,43E-02	6,20E-05	5,04E-05	7,68E-04	-2,60E-03
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	6,70E+01	6,00E-02	4,94E-02	7,11E+00	-2,22E+01
ODP [kg R11-Equiv.]	6,44E-07	1,05E-12	8,65E-13	1,30E-10	3,41E-07
POCP [kg Ethene-Equiv.]	2,81E-02	-8,79E-05	-7,13E-05	3,15E-04	-1,27E-02

Unità funzionale:

1 m² di solaio di un edificio, progettato per una vita utile di 50 anni, con una trasmittanza termica (U) pari a 0.92 W/m².K e inerzia termica (κ_m) pari a 61060 J/m².K

Informazioni aggiuntive:

Elenco dei dati usati nei Moduli A1-A3

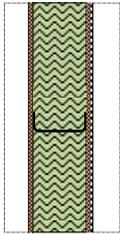
Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Pannello OSB	PE International	Germania	2008
Pannello in cartongesso	PE International	Europa	2008
Profilo in acciaio leggero	Worldsteel	Mondo	2007
Pannello in PUR	PE International	Germania	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli A4 e C2 (ipotizzando una distanza di 20 km)

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Trasporto con il camion	PE International	Mondo	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli C4-D

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Incenerimento del pannello OSB	PE International	Germania	2008
Incenerimento del pannello in PUR	PE International	Europa	2011
Smaltimento in discarica dei materiali inerti	PE International	Germania	2011
Riciclo dell'acciaio	Worldsteel	Mondo	2007

B2010.20 Parete esterna					
B2010.20.1e	Materiali	Spessore/ densità	Scenario di fine vita	Riciclo (%)	
	Pannello OSB (mm)	13	Incenerimento	80	
	Pannello in sughero (mm)	120	Riciclo	80	
	Pannello in cartongesso (mm)	15	Discarica		
	Profilo in acciaio leggero (kg/m ²)	15	Riciclo	90	
B1010.20.1e- LCA					
	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	2,72E-05	3,49E-09	1,60E-09	3,48E-08	-2,10E-04
ADP fossil [MJ]	5,78E+02	1,30E+00	5,94E-01	1,36E+00	-3,05E+02
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	1,60E-01	4,19E-04	1,90E-04	5,92E-04	-4,81E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	1,55E-02	9,64E-05	4,37E-05	9,07E-05	-1,17E-03
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	5,39E+01	9,34E-02	4,28E-02	3,98E-01	-1,73E+01
ODP [kg R11-Equiv.]	6,40E-07	1,64E-12	7,49E-13	7,44E-11	3,41E-07
POCP [kg Ethene-Equiv.]	2,50E-02	-1,37E-04	-6,17E-05	1,54E-04	-1,13E-02

Unità funzionale:

1 m² di solaio di un edificio, progettato per una vita utile di 50 anni, con una trasmittanza termica (U) pari a 0.92 W/m².K e inerzia termica (κ_m) pari a 61060 J/m².K

Informazioni aggiuntive:**Elenco dei dati usati nei Moduli A1-A3**

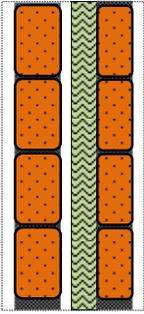
Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Pannello OSB	PE International	Germania	2008
Pannello in cartongesso	PE International	Europa	2008
Profilo in acciaio leggero	Worldsteel	Mondo	2007
Pannello in sughero	PE International	Germania	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli A4 e C2 (ipotizzando una distanza di 20 km)

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Trasporto con il camion	PE International	Mondo	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli C4-D

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Incenerimento del pannello OSB	PE International	Germania	2008
Smaltimento in discarica dei materiali inerti	PE International	Germania	2011
Riciclo dell'acciaio	Worldsteel	Mondo	2007

B2010.20 Parete esterna				
B2010.20.2a	Materiali	Spessore/ densità	Scenario fine vita	di Riciclo (%)
	Strato di laterizi (mm)	11	Discarica	
	Intercapedine di aria (mm)	0		
	Pannello in pannello in lana di roccia (mm)	60	Riciclo	80
	Strato di laterizi (mm)	11	Discarica	
B1010.20.2a- LCA				
	A1-A3	A4	C2	C4
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	4,00E-06	1,37E-08	1,20E-08	1,55E-06
ADP fossil [MJ]	6,11E+02	5,10E+00	4,46E+00	6,05E+01
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	1,33E-01	1,65E-03	1,43E-03	2,64E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	1,58E-02	3,79E-04	3,28E-04	4,04E-03
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	8,12E+01	3,67E-01	3,21E-01	1,78E+01
ODP [kg R11-Equiv.]	3,62E-09	6,43E-12	5,62E-12	3,32E-09
POCP [kg Ethene-Equiv.]	1,21E-02	-5,37E-04	-4,64E-04	6,86E-03

Unità funzionale:

1 m² di solaio di un edificio, progettato per una vita utile di 50 anni, con una trasmittanza termica (U) pari a 0.92 W/m².K e inerzia termica (κ_m) pari a 61060 J/m².K

Informazioni aggiuntive:

Elenco dei dati usati nei Moduli A1-A3

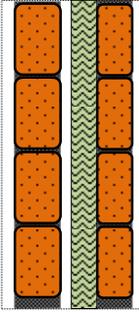
Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Laterizio	PE International	Germania	2011
Pannello in pannello in lana di roccia	PE International	Europa	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli A4 e C2 (ipotizzando una distanza di 20 km)

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Trasporto con il camion	PE International	Mondo	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli C4-D

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Smaltimento in discarica dei materiali inerti	PE International	Germania	2011

B2010.20 Parete esterna				
B2010.20.2b	Materiali	Spessore/ densità	Scenario di fine vita	Riciclo (%)
	Strato di laterizi (mm)	11	Discarica	
	Intercapedine di aria (mm)	0		
	Pannello in EPS (mm)	60	Incenerimento	80
	Strato di laterizi (mm)	11	Discarica	

B1010.20.2b - LCA					
	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	2,81E-06	1,34E-08	1,17E-08	1,56E-06	-4,49E-08
ADP fossil [MJ]	5,94E+02	4,97E+00	4,35E+00	6,06E+01	-3,21E+01
AP [kg SO2-Equiv.]	7,23E-02	1,61E-03	1,39E-03	2,65E-02	-1,22E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	8,96E-03	3,70E-04	3,20E-04	4,06E-03	-7,17E-04
GWP [kg CO2-Equiv.]	7,46E+01	3,58E-01	3,13E-01	2,09E+01	-2,46E+00
ODP [kg R11-Equiv.]	8,86E-08	6,27E-12	5,48E-12	3,31E-09	-4,97E-11
POCP [kg Ethene-Equiv.]	2,74E-02	-5,24E-04	-4,52E-04	6,85E-03	-7,02E-04

Unità funzionale:

1 m² di solaio di un edificio, progettato per una vita utile di 50 anni, con una trasmittanza termica (U) pari a 0.92 W/m².K e inerzia termica (κ_m) pari a 61060 J/m².K

Informazioni aggiuntive:

Elenco dei dati usati nei Moduli A1-A3

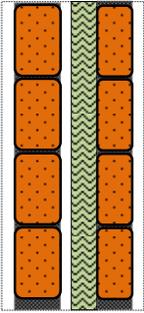
Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Laterizio	PE International	Germania	2011
Pannello in EPS	PE International	Europa	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli A4 e C2 (ipotizzando una distanza di 20 km)

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Trasporto con il camion	PE International	Mondo	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli C4-D

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Incenerimento del pannello in EPS	PE International	Europe	2011
Smaltimento in discarica dei materiali inerti	PE International	Germania	2011

B2010.20 Parete esterna					
B2010.20.2c	Materiali	Spessore/ densità	Scenario di fine vita	Riciclo (%)	
	Strato di laterizi (mm)	11	Discarica		
	Intercapedine di aria (mm)	0			
	Pannello in XPS (mm)	60	Incenerimento	80	
	Strato di laterizi (mm)	11	Discarica		
B1010.20.2c - LCA					
	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	3,64E-06	1,34E-08	1,17E-08	1,57E-06	-7,18E-08
ADP fossil [MJ]	6,51E+02	4,98E+00	4,36E+00	6,08E+01	-5,14E+01
AP [kg SO2-Equiv.]	7,67E-02	1,61E-03	1,39E-03	2,66E-02	-1,95E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	9,23E-03	3,71E-04	3,20E-04	4,09E-03	-1,15E-03
GWP [kg CO2-Equiv.]	7,63E+01	3,59E-01	3,14E-01	2,29E+01	-3,94E+00
ODP [kg R11-Equiv.]	3,00E-09	6,29E-12	5,50E-12	3,32E-09	-7,96E-11
POCP [kg Ethene-Equiv.]	1,15E-02	-5,25E-04	-4,53E-04	6,87E-03	-1,12E-03

Unità funzionale:

1 m² di solaio di un edificio, progettato per una vita utile di 50 anni, con una trasmittanza termica (U) pari a 0.92 W/m².K e inerzia termica (κ_m) pari a 61060 J/m².K

Informazioni aggiuntive:

Elenco dei dati usati nei Moduli A1-A3

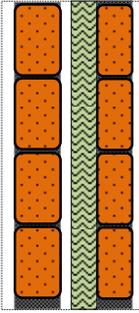
Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Laterizio	PE International	Germania	2011
Pannello in XPS	PE International	Germania	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli A4 e C2 (ipotizzando una distanza di 20 km)

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Trasporto con il camion	PE International	Mondo	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli C4-D

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Incenerimento del pannello XPS	PE International	Europa	2011
Smaltimento in discarica dei materiali inerti	PE International	Germania	2011

B2010.20 Parete esterna					
B2010.20.2d	Materiali	Spessore/ densità	Scenario di fine vita	Riciclo (%)	
	Strato di laterizi (mm)	11	Discarica		
	Intercapedine di aria (mm)	0			
	Pannello in PUR (mm)	60	Incenerimento	80	
	Strato di laterizi (mm)	11	Discarica		
B1010.20.2d - LCA					
	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	3,13E-05	1,34E-08	1,17E-08	1,57E-06	-4,52E-08
ADP fossil [MJ]	7,17E+02	4,98E+00	4,36E+00	6,12E+01	-3,22E+01
AP [kg SO2-Equiv.]	8,33E-02	1,61E-03	1,39E-03	2,77E-02	-1,21E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	1,09E-02	3,71E-04	3,20E-04	4,37E-03	-7,15E-04
GWP [kg CO2-Equiv.]	8,22E+01	3,59E-01	3,14E-01	2,11E+01	-2,46E+00
ODP [kg R11-Equiv.]	4,11E-09	6,29E-12	5,50E-12	3,34E-09	-4,99E-11
POCP [kg Ethene-Equiv.]	9,80E-03	-5,25E-04	-4,53E-04	6,92E-03	-7,02E-04

Unità funzionale:

1 m² di solaio di un edificio, progettato per una vita utile di 50 anni, con una trasmittanza termica (U) pari a 0.92 W/m².K e inerzia termica (κ_m) pari a 61060 J/m².K

Informazioni aggiuntive:**Elenco dei dati usati nei Moduli A1-A3**

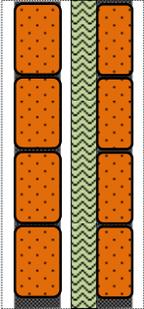
Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Laterizio	PE International	Germania	2011
Pannello in PUR	PE International	Germania	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli A4 e C2 (ipotizzando una distanza di 20 km)

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Trasporto con il camion	PE International	Mondo	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli C4-D

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Incenerimento del pannello in PUR	PE International	Europa	2011
Smaltimento in discarica dei materiali inerti	PE International	Germania	2011

B2010.20 Parete esterna				
B2010.20.2e	Materiali	Spessore/ densità	Scenario di fine vita	Riciclo (%)
	Strato di laterizi (mm)	11	Discarica	
	Intercapedine di aria (mm)	0		
	Pannello in sughero (mm)	60	Incenerimento	80
	Strato di laterizi (mm)	11	Discarica	
B1010.20.2e - LCA				
	A1-A3	A4	C2	C4
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	2,27E-06	1,35E-08	1,18E-08	1,55E-06
ADP fossil [MJ]	5,46E+02	5,03E+00	4,40E+00	6,03E+01
AP [kg SO2-Equiv.]	8,06E-02	1,63E-03	1,41E-03	2,63E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	1,16E-02	3,74E-04	3,23E-04	4,03E-03
GWP [kg CO2-Equiv.]	7,57E+01	3,62E-01	3,17E-01	1,77E+01
ODP [kg R11-Equiv.]	2,30E-09	6,35E-12	5,55E-12	3,31E-09
POCP [kg Ethene-Equiv.]	8,25E-03	-5,30E-04	-4,57E-04	6,84E-03

Unità funzionale:

1 m² di solaio di un edificio, progettato per una vita utile di 50 anni, con una trasmittanza termica (U) pari a 0.92 W/m².K e inerzia termica (κ_m) pari a 61060 J/m².K

Informazioni aggiuntive:

Elenco dei dati usati nei Moduli A1-A3

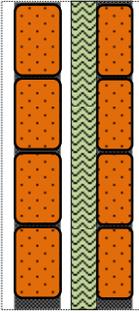
Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Laterizio	PE International	Germania	2011
Pannello in sughero	PE International	Germania	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli A4 e C2 (ipotizzando una distanza di 20 km)

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Trasporto con il camion	PE International	Mondo	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli C4-D

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Smaltimento in discarica dei materiali inerti	PE International	Germania	2011

B2010.20 Parete esterna				
B2010.20.2f	Materiali	Spessore/ densità	Scenario di fine vita	Riciclo (%)
	Strato di laterizi (mm)	11	Discarica	
	Intercapedine di aria (mm)	0		
	Pannello in lana di vetro (mm)	60	Discarica	
	Strato di laterizi (mm)	11	Discarica	

B1010.20.2f - LCA				
	A1-A3	A4	C2	C4
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	6,07E-04	1,35E-08	1,18E-08	1,55E-06
ADP fossil [MJ]	6,13E+02	5,01E+00	4,38E+00	6,05E+01
AP [kg SO2-Equiv.]	9,80E-02	1,62E-03	1,40E-03	2,67E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	1,33E-02	3,73E-04	3,22E-04	5,07E-03
GWP [kg CO2-Equiv.]	7,81E+01	3,61E-01	3,16E-01	1,83E+01
ODP [kg R11-Equiv.]	3,81E-09	6,32E-12	5,53E-12	-3,92E-09
POCP [kg Ethene-Equiv.]	8,60E-03	-5,28E-04	-4,56E-04	7,01E-03

Unità funzionale:

1 m² di solaio di un edificio, progettato per una vita utile di 50 anni, con una trasmittanza termica (U) pari a 0.92 W/m².K e inerzia termica (κ_m) pari a 61060 J/m².K

Informazioni aggiuntive:

Elenco dei dati usati nei Moduli A1-A3

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Laterizio	PE International	Germania	2011
Pannello in lana di vetro	PE International	Europa	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli A4 e C2 (ipotizzando una distanza di 20 km)

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Trasporto con il camion	PE International	Mondo	2011

Elenco dei dati usati nei Moduli C4-D

Processo	Fonte dati	Copertura geografica	Anno
Smaltimento in discarica dei materiali inerti	PE International	Germania	2011
Smaltimento in discarica della lana di vetro	PE International	Germania	2010