NBT

Not Bed Technology

RICICLO DI MATERASSI PER LO SVILUPPO DI UN ISOLANTE INTEGRATO CON UN MATERIALE A CAMBIAMENTO DI FASE

LUDOVICA BRUNO
MATTIA CIRILLO

Politecnico di Torino

Dipartimento di Architettura e Design

Corso di Laurea Magistrale in Architettura Costruzione Città

Tesi di Laurea Magistrale

NBT

Not Bed Technology

Riciclo di materassi per lo sviluppo di un isolante integrato con un materiale a cambiamento di fase

Relatore:

Prof.ssa Valentina Serra

Correlatori:

Prof. Roberto Giordano
Arch. Stefano Fantucci

Candidati:

Ludovica Bruno
Mattia Cirillo

Anno Accademico 2018/2019

INDICE

INTRODUZIONE 8

PARTE I

QUADRO DI RIFERIMENTO

1.1 Circular Economy 14
1.2 Quadro normativo europeo e nazionale 21
1.2.1 Rifiuti e classificazione 26
1.3 Materassi End-Of-Life (EOL) 31

POLIURETANO - PUR

2.1 Produzione di materie plastiche 38
2.2 Poliuretano: tipologie e applicazioni 39
2.3 Schiuma flessibile di poliuretano
2.3.1 Composizione 44
2.3.2 Processo produttivo 45
2.4 Riciclo a fine vita
2.4.1 Tecniche di riciclo 50

PHASE CHANGE MATERIALS - PCMs

3.1 Introduzione ai PCMs 60
3.2 Principali proprietà e tipologie 63
3.3 Tecniche di contenimento 68
3.4 Paraffina
3.4.1 Composizione 70
3.4.2 Processo produttivo 71

PARTE II

NBT PER L'AUTOMOTIVE

4.1 Concept 80
4.2 Prototipazione
4.2.1 materali 84
4.2.2 Preparazione dei provini in laboratorio 87
4.2.3 I campioni NBT 95

MISURAZIONE DELLE PRESTAZIONI TERMICHE

5.1 Conducibilità termica (λ) 103
5.2 Entalpia in funzione della temperatura (H) 107

Modellazione Energetica Dinamica

6.1 Il software WUFI Plus 112
6.2 Il modello 113
6.3 I risultati 123
6.3.1 Simulazione dinamica dell'abitacolo allo stato di fatto 123
6.3.2 Simulazione dinamica dell'abitacolo con l'integrazione del prototipo 126
6.4 Discussione dei risultati 131

Valutazione dell'Ecocompatibilità del Prototipo

7.1 Life Cycle Assessment (LCA) 138
7.1.1 Environmental Product Declaration (EPD) 145
7.2 Bilancio energetico ambientale del prototipo NBT1 150

Conclusioni 162

APPENDICE 168

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA 184

INTRODUZIONE

L'economia circolare o *Circular Economy* è uno degli argomenti più discussi in questo periodo. Questo modello economico punta a migliorare l'attuale sistema di produzione e consumo delle risorse, sviluppando sistemi circolari associati all'estensione della vita dei prodotti, alla loro re-distribuzione, riutilizzo, rigenerazione e riciclo. L'attuale sistema economico-industriale è caratterizzato da un modello lineare che non prevede il reinserimento nel mercato dei prodotti giunti a fine vita, comportando la perdita di risorse e l'accumulo di ingenti quantità di rifiuti nelle discariche. Negli ultimi anni, l'Unione Europea ha promosso lo sviluppo dei principi della *Circular Economy* emanando direttive volte a migliorare la gestione e il trattamento dei rifiuti e incentivando l'innovazione tecnologica delle aziende in materia di riciclo.

Tra le diverse categorie di rifiuti, gli ingombranti creano difficoltà di gestione a causa delle loro dimensioni e, nel caso dei materassi , anche a causa della natura dei materiali non degradabili di cui sono costituiti. Le soluzioni finora applicate per la maggior parte dei materassi sono il deposito in discarica o la termovalorizzazione, perdendo l'opportunità di recuperare materiali caratterizzati da un'elevata vita utile. Il principale materiale costituente i materassi tradizionali è la schiuma flessibile di poliuretano, la cui produzione ha un elevato impatto sull'ambiente in termini di consumi di energia e di risorse. Per questo motivo, alcune aziende hanno iniziato a trattare il riciclo dei materassi per ottenere materie prime seconde da re-immettere nei cicli di produzione.

Questa tesi si prefigge di applicare i principi della *Circular Economy* sviluppando un prototipo che combina un pannello ottenuto dal riciclo dei materassi con un materiale a cambiamento di fase (*Phase Change Material* - PCM). Lo sviluppo del prototipo è reso possibile dalla collaborazione tra il Dipartimento Energia (DENERG) e il Dipartimento di Architettura e Design (DAD) del Politecnico di Torino con la startup *ReMat* che collabora con le aziende di riciclo *Secondly* in Francia e *Cormatex* in Italia. Il prototipo è realizzato nel Laboratorio Sistemi Tecnologici Innovativi (LASTIN) del Politecnico di Torino e analizzato dal punto di vista delle prestazioni termiche nel Laboratorio del Dipartimento Energia.

Nel prototipo, la matrice poliuretanica fornisce proprietà di isolamento termico e acustico, mentre il PCM dona al composto prestazioni termiche dinamiche grazie alla capacità di immagazzinare e rilasciare calore durante la transizione di fase. Il PCM impiegato in questa sperimentazione è la paraffina prodotta dall'azienda tedesca

Rubitherm, un materiale di origine organica con elevate capacità di accumulo di calore latente. Combinando il pannello riciclato con la paraffina fusa tramite imbibizione, si ottiene un composto isolante con molteplici possibilità di applicazione.

Sulla base del comportamento noto dei singoli materiali, sono state ipotizzate applicazioni in ambienti di piccole dimensioni, in cui il PCM riesca ad assorbire l'eccessivo calore generato dalla radiazione solare durante il giorno, per rilasciarlo nelle ore notturne. Situazioni di questo genere si verificano, per esempio, in padiglioni temporanei tipici dell'architettura effimera, in strutture vetrate prive di schermature solari o nei box prefabbricati per cantieri. Un caso limite, per le temperature interne raggiunte, è l'abitacolo di un autoveicolo, nel quale le ridotte dimensioni e le ampie superfici vetrate causano un forte surriscaldamento nel periodo estivo. Questo fenomeno causa agli utenti forti discomfort che potrebbero essere ridotti dall'inserimento del prototipo studiato.

La tesi si compone di due parti: la prima è una sezione di inquadramento e di ricerca scientifica sullo stato dell'arte dei materiali trattati, la seconda riporta le sperimentazioni effettuate sui prototipi, i relativi risultati e una *Life Cycle Assessment* (LCA), eseguita su uno dei prototipi realizzati. Più nello specifico, la Parte I comprende i primi tre capitoli della tesi, di cui il capitolo 1 tratta il tema della *Circular Economy* e l'inquadramento normativo sui rifiuti, con particolare attenzione ai materassi a fine vita. I capitoli 2 e 3 trattano i principali materiali che compongono il nuovo prototipo, ossia la schiuma flessibile di poliuretano (PUR) e la paraffina. In questi due capitoli si descriveranno i materiali, le loro proprietà e classificazioni, l'intero processo produttivo e, per la schiuma PUR, le tecniche di riciclo finora sviluppate. La Parte II comprende invece i capitoli dal 4 al 7. Il capitolo 4 tratta il concept e la prototipazione, fissando gli obiettivi e l'ambito di applicazione, descrivendo i materiali utilizzati e le fasi di realizzazione, concludendo con una discussione sui comportamenti riscontrati. Nei capitoli 5 e 6, invece, si analizzano i prototipi sotto il profilo termico, attraverso misurazioni dirette in laboratorio e misurazioni indirette per mezzo di un software di modellazione energetica dinamica che ripropone le condizioni climatiche del veicolo. La simulazione attraverso un modello digitale permette di confrontare il clima generato all'interno dell'auto prima e dopo l'inserimento del prototipo, valutando i vantaggi generati. La caratterizzazione del prototipo e la descrizione dettagliata del suo funzionamento sono oggetto di studio in questa tesi.

PARTE I

1

QUADRO DI RIFERIMENTO

1.1 Circular Economy

Di fronte alla costante diminuzione della disponibilità di materie prime, dovuta al consumo eccessivo delle risorse, diventa sempre più necessaria l'introduzione di un nuovo modello economico che ne migliori l'uso e che riduca l'impatto dell'uomo sulla Terra. L'Economia Circolare o *Circular Economy* è un nuovo modello di produzione e consumo che si è sviluppato negli ultimi anni con l'obiettivo di estendere il ciclo di vita dei prodotti, per ridurre al minimo le quantità di rifiuti generati dalla nostra società.

L'attuale economia industriale è caratterizzata da un modello lineare di consumo denominato *take-make-dispose* (letteralmente "prendi-crea-getta") che si compone delle seguenti fasi (Fig.1):

1. Estrazione delle materie prime;
2. Approvvigionamento e lavorazione delle risorse da parte delle aziende per produrre beni;
3. Vendita dei beni ai consumatori;
4. Utilizzo dei beni da parte dei consumatori;
5. Scarto dei beni post-uso.

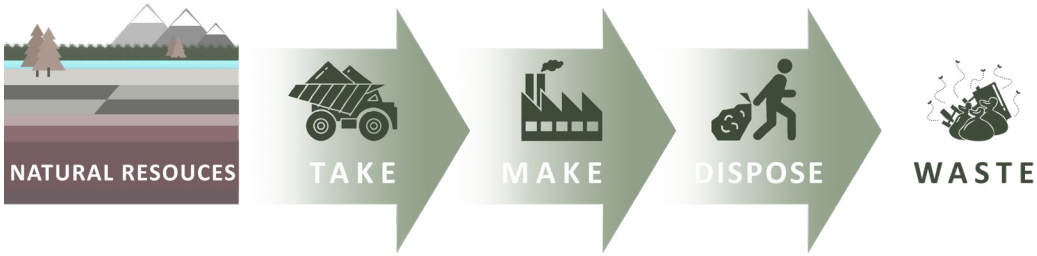
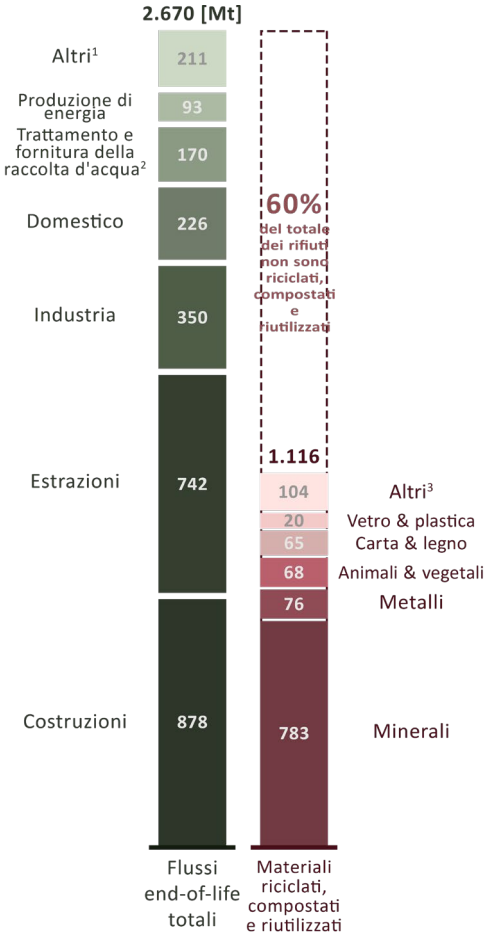


Fig. 1 Diagramma della *Linear Economy.*



1 Include servizi e agricoltura, silvicoltura e pesca
2 Include anche fognature e altre attività di gestione dei rifiuti
3 Comprende oli usati, gomma, tessuti, rifiuti domestici, rifiuti chimici e altri non specificati

Fig. 2 Statistica Eurostat sui rifiuti prodotti e riciclati nel 2010 in Europa. Fonte dati: Ellen MacArthur Foundation, *Towards the Circular Economy* (2013), p. 17.

Il modello lineare non è più sostenibile, poichè comporta un grande consumo e spreco di risorse. Secondo tale sistema, il bene giunto a fine vita non viene in alcun modo reimmesso all'interno del ciclo di produzione, pertanto è destinato a diventare rifiuto. I dati forniti dall'OECD (*Organisation for Economic Co-operation and Development*) dimostrano che le materie prime estratte dai paesi membri nel 2010 ammontano a 65 miliardi di tonnellate, prevedendo un aumento fino a 82 miliardi di tonnellate per l'anno 2020.[1] A causa di questa consuetudine, si perde un importante quantitativo di risorse che potrebbero essere impiegate nella produzione di nuovi prodotti a partire da materiali riciclati, diminuendo così la dipendenza dalle materie prime vergini.

Un altro svantaggio di questo sistema è la perdita di valore intrinseco dei materiali che costituiscono i prodotti scartati. Un prodotto a fine vita, infatti, possiede delle potenzialità che possono essere ancora sfruttate attraverso processi di riuso, trasformazione, rigenerazione e riciclo.

Qualsiasi sistema basato sul consumo piuttosto che sull'uso riparativo di risorse non rinnovabili comporta un incontrollato accumulo di rifiuti, con conseguente difficoltà di gestione e smaltimento. In Europa, nel 2010 sono stati prodotti 2,7 miliardi di tonnellate di rifiuti, ma solo il 40% di questi è stato riutilizzato o riciclato (Fig. 2). Sul totale di 1,1 miliardi di tonnellate di rifiuti riciclati all'anno, la plastica e il vetro coprono meno del 2%, corrispondenti a 20 milioni di tonnellate.[2]

1 Ellen MacArthur Foundation, *Towards the Circular Economy* (2013), p. 7.
2 *Op. cit.*, pp. 16-17.

Il continuo flusso di estrazione e di accumulo di materia ha causato nei decenni gravi danni ambientali, dovuti alla contaminazione dei suoli e delle acque, emettendo in atmosfera grandi quantità di gas serra responsabili del cambiamento climatico. Oltre al danno ambientale, a gravare sul sistema di produzione vi è anche l'aspetto economico, poiché ad una diminuzione della disponibilità di materia prima corrisponde un aumento dei costi di estrazione e produzione.

La *Ellen MacArthur Foundation*, fondazione britannica nata nel 2009 con lo scopo di promuovere la transizione del nostro sistema produttivo lineare verso uno di tipo circolare, afferma che tale cambiamento genera non solo grandi benefici ambientali e sociali ma anche opportunità commerciali ed economiche. Il modello che meglio promuove tali opportunità è, infatti, quello della *Circular Economy*. Questo sistema si basa sui medesimi processi del sistema lineare al quale si aggiunge un fondamentale processo finale, quello del riciclo. Attraverso il riciclo e il riuso dei materiali post-consumo si riesce, infatti, a ridurre il carico della domanda di materie prime e di energia, necessarie per produrre nuovi beni (Fig. 3).

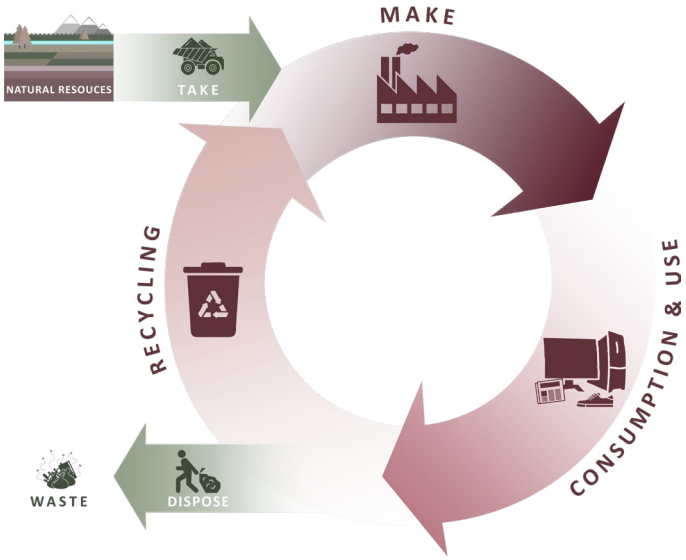


Fig. 3 Diagramma della *Circular Economy.*

L’applicazione di questo modello comporta numerosi vantaggi:

- ridurre l’impatto ambientale;
- ridurre la richiesta di materie prime estratte;
- favorire l’innovazione tecnologica e la competitività nel mercato delle aziende.

Al fine di promuovere un'economia circolare globale e di riuscire a rispettare gli obiettivi prefissati, la collaborazione tra le Nazioni sarà indispensabile, come dimostrato dall'*Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile*, un programma d’azione firmato nel 2015 dai governi dei 193 Paesi membri delle Nazioni Unite. Tale progetto si compone di 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (*Sustainable Development Goals, SDGs*) articolati in 169 target che guideranno le Nazioni per i prossimi 15 anni verso uno sviluppo più responsabile. Tali obiettivi promuovono tematiche ampie ma molto importanti come l’uguaglianza sociale e la lotta alla povertà, la protezione del nostro Pianeta, la responsabilità verso il consumo e lo sviluppo economico.

Fig. 4 *Sustainable Development Goals (SDGs)*, Fonte: Dipartimento per la Pubblica Informazione Nazioni Unite, *Trasformare il nostro mondo: Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile* (2016).

La riduzione dell'impatto ambientale dovuto alle attività umane è uno dei principali obiettivi della *Circular Economy* che può essere raggiunto *in primis* riducendo la quantità di rifiuti prodotti. Su questo tema fortunatamente si sono sviluppate numerose strategie come la raccolta differenziata dei rifiuti urbani che permette di separare per categoria carta, plastica, vetro, metalli e rifiuti organici, ponendo particolare attenzione alla gestione e allo smaltimento dei rifiuti altamente inquinanti, come quelli tossici, infiammabili e radioattivi. A tal proposito, la Comunità Europea ha emanato nel Maggio 2018 un pacchetto di Direttive che regola la gestione dei rifiuti e stabilisce che entro il 2025 almeno il 55% dei rifiuti urbani dovrà essere riciclato, aumentando l'obiettivo al 60% entro il 2030 e al 65% entro il 2035, riducendo i rifiuti conferiti in discarica al 10% entro il 2035.[3]

Horizon 2020 è un programma di finanziamento emanato dall'UE per il quale sono stati stanziati 80 miliardi di Euro a favore della ricerca e dell'innovazione,[4] per promuovere la competitività e la crescita degli Stati europei. Tale strumento ha come obiettivi il raggiungimento di alti livelli di produttività, occupazione e coesione sociale, permettendo anche alle piccole e medie imprese, Istituti di ricerca, Università e soggetti pubblici e privati di realizzare i loro progetti di sviluppo, accedendo ai finanziamenti grazie ad una struttura più semplice e ad una burocrazia più rapida. Tra i campi di sviluppo previsti, vi sono le *Societal Challenges* alle quali sono state destinate quasi 32 miliardi di Euro per affrontare le sfide nei settori di salute, agricoltura sostenibile, energia pulita e rinnovabile e trasporti efficienti dal punto di vista dei consumi.

A livello nazionale, nel novembre del 2017 il Ministero dello Sviluppo Economico (MISE) e il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM) hanno redatto il documento "Verso un modello di economia circolare per l'Italia",[5] con l'obiettivo di definire i criteri generali dell'economia circolare e stabilire degli indicatori che misurino gli aspetti economici e fisici delle risorse. Questi indicatori sono divisi su tre livelli in funzione della loro area di applicazione:[6]

- livello macro: a scala nazionale;

3 Parlamento Europeo, *Pacchetto sull'economia circolare: nuovi obiettivi di riciclaggio dell'UE* (2018).
4 Finanziamenti diretti della Commissione Europea, *Horizon 2020,* http://www.finanziamentidiretti.gov.it/?page_id=1936
5 Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare in collaborazione con il Ministero dello Sviluppo Economico, *Economia circolare ed uso efficiente delle risorse. Indicatori per la misurazione dell'economia circolare* (2018), p. 2.
6 *Op. cit*., pp. 8-12.

- livello meso: regioni, aree metropolitane, aree industriali, sistemi di produzione, ecc;
- livello micro: comuni e singole imprese.

Per ciascun livello sono stati individuati cinque pilastri fondamentali che caratterizzano l'economia circolare:

- *Input*: riguarda le materie derivate da fonti rinnovabili, non rinnovabili e riciclate, comprendendo anche i processi che vanno dalla progettazione alla produzione, fino al riciclo e rigenerazione a fine vita;
- *Prodotto come servizio*: modello economico per il quale un consumatore non paga per acquistare un prodotto, ma per il suo utilizzo, riducendo così l'impatto sull'ambiente;
- *Condivisione/affitto/noleggio, uso e consumo*: prevede la condivisione di un prodotto tra più utenti. Queste azioni consentono di ammortizzare i costi di utilizzo, ridurre il numero di prodotti sul mercato, creando opportunità di interazione sociale;
- *Estensione vita utile, riutilizzo e riparazione*: comprende tutte le azioni mirate all'estensione della vita dei prodotti, facilitando la loro riparazione e il riuso, anche in ambiti differenti;
- *Output*: riguarda le operazioni inerenti il trattamento dei rifiuti, dei sottoprodotti e delle materie prime seconde, con l'obiettivo di ridurre la produzione di rifiuti, massimizzando il riciclo.

Gli indicatori presenti all'interno delle categorie possono essere quantificati attraverso due tipologie di misurazione:

- misurazione della quantità di risorse in massa, volume o energia (tonnellate, %, litri, kWh);
- misurazione economica attraverso indici monetari (Euro, Euro/t).

Per il raggiungimento degli obiettivi della *Circular Economy* è necessario che tutte le figure diano il proprio contributo ed il massimo impegno, non solo a scala globale ma anche locale. Produttori e consumatori sono infatti gli attori principali di questo sistema e hanno, quindi, grandi responsabilità. Per questo motivo molti Governi hanno deciso di estendere ai produttori la responsabilità sulla gestione della fase di post-consumo dei beni prodotti, sia sotto l'aspetto fisico sia economico. Tale onere, denominato EPR (*Extended Producer Responsibility*), incentiverà le aziende nel prevenire i rifiuti alla fonte, migliorando i sistemi di produzione e calibrando l'uso delle

risorse, favorendo il riutilizzo, la rigenerazione e il riciclo dei propri prodotti.

I principi di un'economia circolare non si applicano solamente ai prodotti finiti per ridurre gli sprechi, ma servono per intraprendere un percorso che comincia dalla progettazione dei materiali, evitando sostanze chimiche tossiche e non riciclabili, preferendo laddove possibile l'impiego di materiali biodegradabili al posto di materie plastiche, utilizzando energie rinnovabili durante la fase di produzione e studiando il design per ottimizzare il ciclo di smontaggio e riutilizzo a fine vita.

La *Circular Economy* si compone di due cicli di consumo, uno tecnico e uno biologico. Il ciclo tecnico tratta i beni durevoli e permette di recuperare i prodotti e i materiali di cui sono composti attraverso vari processi di trasformazione e di riciclo. In tale circostanza, il concetto di consumatore viene sostituito con quello di utente, dove si richiede un nuovo contratto tra imprese e clienti in base ai prodotti commercializzati. I beni durevoli possono essere quindi affittati, condivisi o venduti con incentivi che garantiscano la restituzione o il riutilizzo in futuro del prodotto intero o dei suoi singoli componenti. Il ciclo biologico, invece, può essere utilizzato per i materiali biodegradabili per reintegrarli in natura attraverso il compostaggio.

1.2 Quadro normativo europeo e nazionale

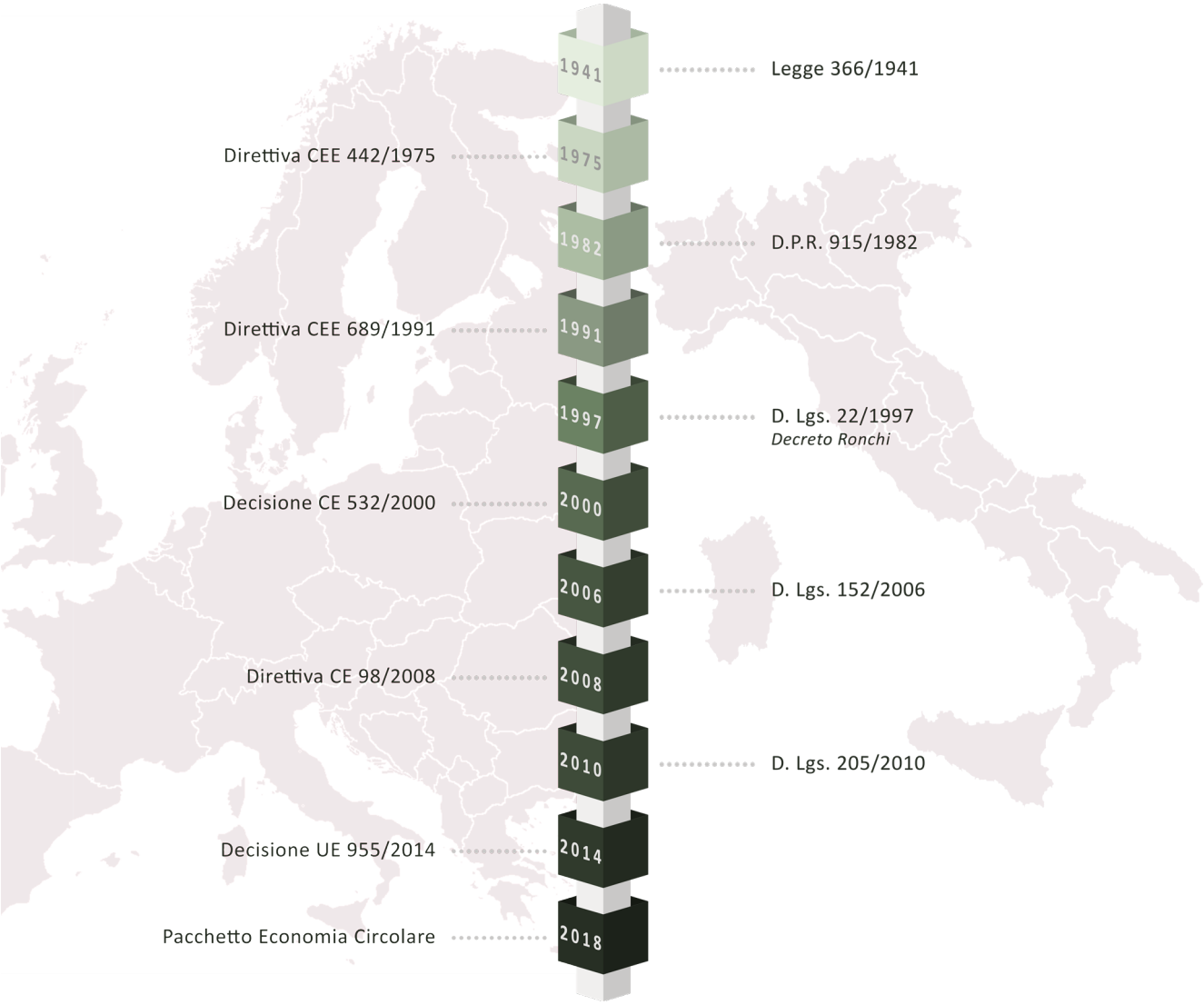


Fig. 5 Linea temporale sul quadro normativo europeo e nazionale nel campo dei rifiuti.

In Italia la prima legge che si è occupata di rifiuti è stata la Legge 366/1941, che aveva come obiettivo principale il mantenimento del decoro urbano e dell'igiene. Essa prendeva in considerazione solamente i rifiuti solidi urbani (RSU) provenienti dalle civili abitazioni e dalle aree pubbliche, che venivano raccolti senza differenziazione e accumulati in discariche non controllate oppure inceneriti.

La Direttiva CEE 442/1975 ha definito per la prima volta il rifiuto come "*qualsiasi sostanza od oggetto di cui il detentore si disfi o abbia l'obbligo di disfarsi secondo le disposizioni nazionali vigenti*". La definizione fa presupporre che prima o poi qualsiasi bene sarà destinato a diventare rifiuto e lascia intendere che tale trasformazione dipende molto dalla volontà del consumatore. È stato il primo strumento giuridico che ha introdotto tematiche importanti come il concetto di riciclo e di riuso e la gestione dei rifiuti al fine di tutelare l'ambiente e la salute umana, facendo particolare attenzione ai rifiuti pericolosi.

In Italia, fino agli anni '70 - '80 del Novecento, le poche leggi presenti in materia ambientale non avevano come vero obiettivo la protezione degli ecosistemi, ma la difesa dell'essere umano considerato come soggetto economico che sfruttava le risorse naturali. La logica di approccio alla politica ambientale era di riparazione piuttosto che di prevenzione, ossia intervenire quando il danno si era ormai verificato. Grazie alla Direttiva CEE n. 442, nel 1975 il rischio di inquinamento ambientale dovuto ai rifiuti è stato per la prima volta oggetto di regolamentazione in Europa.

La precedente direttiva europea sui rifiuti è stata integrata nella legislazione italiana attraverso l'emanazione del Decreto del Presidente della Repubblica n. 915 del 1982, all'interno del quale i rifiuti sono stati classificati in urbani, speciali e tossico-nocivi. In questo decreto sono state definite le competenze di Stato, Regioni e Comuni, relative alla raccolta, gestione e smaltimento dei rifiuti. Per quanto concerne il divieto di abbandono dei rifiuti, è stato introdotto il principio di "chi inquina paga", prevedendo sanzioni pecuniarie e/o penali per chi avesse smaltito rifiuti in aree pubbliche senza autorizzazioni e in modo incontrollato.

Nel 1991 l'Europa ha emanato la Direttiva CEE 689/1991 relativa ai rifiuti pericolosi, classificandoli in gruppi in funzione delle loro caratteristiche e origine, aggiungendo quattordici classi di pericolosità identificate dalla lettera H seguita dal numero progressivo del gruppo (es. H6 tossico).

La Direttiva CEE 689/1991 è stata attuata in Italia attraverso il D. Lgs. 22/1997, conosciuto anche come *Decreto Ronchi* dal nome del Ministro che lo firmò. Tale decreto ha classificato i rifiuti in quattro grandi categorie in funzione della loro origine, distinguendo tra rifiuti solidi urbani (RSU) e rifiuti speciali (RS), e in funzione alla loro pericolosità tra rifiuti pericolosi (RP) e non pericolosi. Esso ha inoltre promosso la raccolta differenziata dei rifiuti finalizzata al riciclo, sviluppatasi in Italia a partire dagli anni '90. L'aspetto più importante di questo decreto è che ha cambiato la visione dell'inquinamento generato dai rifiuti, sviluppando il criterio della prevenzione che consente di ridurre a monte la quantità di rifiuti prodotti, gestendo lo smaltimento in maniera più controllata e sicura.

L'innovazione riguardante la classificazione dei rifiuti in base alla loro origine è stata introdotta dalla Decisione CE 532/2000 con l'istituzione del Catalogo Europeo dei Rifiuti (Codici CER) che identifica univocamente ogni tipo di rifiuto attraverso un codice a sei cifre. Il codice CER di un materiale stabilisce inoltre se questo è di natura pericolosa con l'apposizione di un asterisco (*).

Il D. Lgs. 152/2006, entrato in vigore il 29 Aprile 2006, è l'attuale normativa vigente in Italia. Esso è definito anche *Testo Unico Ambientale (TUA)* in quanto ha accorpato tutte le norme precedenti in un unico decreto, apportando modifiche e aggiornamenti dove necessario. Il decreto è stato emanato sulla base della Legge 302/2004 che ha delegato il Governo a riordinare, coordinare e integrare la legislazione sul tema ambientale. Tale decreto si compone di sei parti:

- Parte I: disposizioni comuni e principi generali;
- Parte II: procedure per la *Valutazione Ambientale Strategica (VAS)*, per la *Valutazione d'Impatto Ambientale (VIA)* e per l'*Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA)*;
- Parte III: difesa del suolo, tutela delle acque e gestione delle risorse idriche;
- Parte IV: gestione dei rifiuti e bonifica dei siti inquinati;
- Parte V: tutela dell'aria e riduzione delle emissioni in atmosfera;
- Parte VI: risarcimenti contro i danni all'ambiente.

La parte quarta di questo decreto disciplina la gestione dei rifiuti secondo i principi di precauzione e prevenzione, di proporzionalità, di responsabilizzazione e cooperazione, e di "chi inquina paga". La fase di gestione, considerata la più importante per salvaguardare la protezione dell'ambiente, fa riferimento a tutti i processi: dalla raccolta dei rifiuti al loro trasporto, al recupero e allo smaltimento, compreso il controllo su tali operazioni. Il Testo Unico Ambientale ha abrogato il *Decreto Ronchi* del 1997 ma ha mantenuto la classificazione dei rifiuti nelle quattro categorie: RSU, RS, RP e non pericolosi. Esso, inoltre, ha introdotto in Italia la codificazione CER emanata dalla Decisione CE 532/2000 sopra citata e ha definito l'obiettivo di raggiungere almeno il 65% di rifiuti riciclati, ottenuti dalla raccolta differenziata, entro la fine del 2012.

La Direttiva CE 98/2008, definita come *direttiva quadro sui rifiuti*, ha introdotto cinque operazioni relative alla gestione dei rifiuti, ordinate in base alla priorità:

1. Prevenzione del rifiuto;
2. Preparazione per il riutilizzo;
3. Riciclo;
4. Recupero di altro tipo (es. energetico);
5. Smaltimento (es. discarica).

Da questo elenco si può evincere che l'intento principale della Comunità Europea è quello di prevenire la produzione di rifiuti e favorire il riutilizzo dei prodotti e, quando questo non sia possibile, riciclarli per dare vita a nuovi prodotti, riducendo l'impiego di materie prime vergini. Le ultime fasi sono il recupero di energia attraverso l'incenerimento e lo smaltimento in discarica. L'incenerimento permette di ottenere energia termica dalla combustione dei rifiuti, ma ha lo svantaggio di perdere materia, mentre lo smaltimento in discarica non permette alcun recupero, né di energia né di materia. In relazione alla fase di riciclo, la direttiva prefigge a livello europeo il raggiungimento entro il 2020 del 50% in peso di rifiuti domestici riciclati (quali carta, vetro, plastica e metalli) e il riciclo o riutilizzo del 70% in peso dei rifiuti non pericolosi derivanti dalle operazioni edilizie di costruzione e demolizione.

La Direttiva CE 98/2008 ha introdotto inoltre il concetto di responsabilità estesa del produttore (EPR). Tale responsabilità può includere, per esempio, l'obbligo di ritiro dei prodotti post-uso e l'obbligo di smaltirli a proprio carico. Queste misure vogliono incoraggiare lo sviluppo e la ricerca nelle fasi di produzione e commercializzazione di prodotti durevoli e adatti all'uso multiplo che, dopo essere diventati rifiuti, possono essere recuperati in modo adeguato e smaltiti compatibilmente con l'ambiente.

La Direttiva CE 98/2008 è stata attuata in Italia con la pubblicazione del D. Lgs. 205/2010, il quale ha introdotto in Italia la responsabilità estesa del produttore nell'art. 178-bis e ha apportato modifiche al precedente decreto n. 152 del 2006, in particolare alla parte IV relativa alla gestione dei rifiuti.

Nel 2014, con la Decisione UE 955/2014, viene implementato ed aggiornato il catalogo CER dei rifiuti portando l'elenco da 839 voci a 842, identificando come pericolosi alcuni materiali che prima non erano stati ritenuti tali.

L'Unione Europea ha avviato nel 2015 un "Piano d'azione per l'economia circolare" che prevede una rivisitazione delle fasi dell'attività economica, agendo sul reperimento delle risorse, sulla produzione dei beni e sulla gestione dei rifiuti. È importante quindi ridurre gli sprechi per garantire, fin dalla progettazione, maggiore durabilità ai prodotti e massimizzare la riutilizzabilità e riciclabilità dei beni giunti a fine vita.

A favore dello sviluppo della *Circular Economy*, nel 2018 l'UE ha emanato il *Pacchetto Economia Circolare,* composto da quattro nuove direttive che modificano alcune delle precedenti:

- Direttiva UE 849/2018 che modifica le direttive sui veicoli fuori uso, sulle pile e accumulatori esausti, sui rifiuti derivanti da apparecchiature elettriche e elettroniche (Raee);
- Direttiva UE 850/2018 che modifica la direttiva sulle discariche;
- Direttiva UE 851/2018 che modifica la direttiva "madre" sui rifiuti CE 98/2008;
- Direttiva UE 852/2018 che modifica la direttiva sugli imballaggi.

Oltre a ciò, il Pacchetto Economia Circolare fissa nuovi obiettivi sul riciclo dei rifiuti:

- Riciclo dei rifiuti urbani: 55% entro il 2025, 60% entro il 2030 e 65% entro il 2035;

- Smaltimento in discarica: max 10% entro il 2035;
- Riciclo imballaggi: 65% entro il 2025 e 70% entro il 2030;
- Raccolta separata dei rifiuti tessili e rifiuti pericolosi delle utenze domestiche a partire dal 2025;
- Rifiuti biodegradabili raccolti separatamente o riciclati a casa attraverso il compostaggio entro il 2024.

1.2.1 Rifiuti e classificazione

«*Rifiuto: qualsiasi sostanza od oggetto di cui il detentore si disfi o abbia l'intenzione o abbia l'obbligo di disfarsi*».[7]

Tale nozione corrisponde all'attuale definizione di rifiuto inserito nell'Art. 3 della normativa europea CE 98/2008 relativa ai rifiuti, la quale è stata inglobata nella legislazione italiana attraverso il D. Lgs. 205/2010 attualmente in vigore.

Facendo riferimento all'art. 6 della Direttiva CE 98/2008, sono catalogati come rifiuti tutti quei materiali che non sono più utilizzabili per scopi specifici, per i quali non esiste più un mercato o una domanda, che non soddisfano i requisiti tecnici e gli standard applicabili ai prodotti e che portano impatti negativi sull'ambiente e sulla salute umana.

I principi sui quali si basa la gestione dei rifiuti in Italia sono stati introdotti dal Testo Unico Ambientale (D. Lgs. 152/2006) successivamente annessi nel D. Lgs. 205/2010. Essi sono:

- *Principio di precauzione e prevenzione*: secondo il quale si devono adottare tutte le possibili precauzioni al fine di evitare rischi ambientali;
- *Principio di proporzionalità*: secondo il quale l'intensità delle misure adottate deve essere proporzionato al rischio;
- *Principio di responsabilizzazione e di cooperazione*: che interessa tutti i soggetti coinvolti nella produzione, distribuzione, utilizzo e consumo dei beni che producono rifiuti;

7 Direttiva CE 98/2008, *Relativa ai rifiuti e che abroga alcune direttive*.

- *Principio di "chi inquina paga"*: secondo il quale gli oneri relativi alle attività di smaltimento dei rifiuti sono a carico di chi li produce.

Con riferimento all'art. 184 del D. Lgs. 152/2006,[8] i rifiuti sono classificati in macro-categorie.

In funzione della loro origine si dividono in:

- Rifiuti Solidi Urbani (RSU)
- Rifiuti Speciali (RS)

E in funzione della loro pericolosità in:

- Rifiuti Pericolosi
- Rifiuti Non Pericolosi

I Rifiuti Solidi Urbani differenziati, indifferenziati e ingombranti, sono quelli derivanti dalle attività domestiche, quindi da quei luoghi adibiti a civile abitazione, locali e negozi. Rientrano in tale categoria anche i rifiuti derivanti dalla pulizia delle strade, dalle aree verdi pubbliche e private, come giardini e parchi, dalla pulizia dei corsi d'acqua e dei litorali.

I Rifiuti Speciali sono invece quelli generati dalle attività agricole, dal settore edilizio che comprende scavi, demolizioni e costruzioni, dagli scarti delle lavorazioni industriali e dalle attività commerciali, sanitarie e minerarie. Sono ivi compresi i rifiuti derivanti dalle operazioni di recupero e smaltimento dei rifiuti e i fanghi prodotti dai trattamenti di depurazione delle acque reflue. Sono altresì catalogati come speciali i veicoli a motore, i macchinari e le apparecchiature fuori uso.

Tra i rifiuti urbani, soprattutto tra quelli speciali, possono essere presenti materiali con elevate quantità di sostanze pericolose che devono essere trattate con tipologie di smaltimento specifiche al fine di evitare contaminazioni e danni ambientali. Per questo motivo devono essere raccolti separatamente dai rifiuti non

8 D. Lgs. 152/2006*, Norme in materia ambientale*.

pericolosi. Essi si suddividono in quindici classi, ordinati da H1 a H15 in funzione delle loro caratteristiche di pericolosità e comprendono gli infiammabili, gli esplosivi, i tossici, i corrosivi, i cancerogeni, ecc.

I rifiuti pericolosi si dividono in due gruppi:

- Rifiuti Urbani Pericolosi (RUP)
- Rifiuti Speciali Pericolosi

I RUP sono rifiuti pericolosi di origine civile che vengono prodotti in quantità minori se comparati a quelli speciali pericolosi, e ne fanno parte i medicinali scaduti, le pile, le batterie, le vernici e gli oli esausti.

I Rifiuti Speciali Pericolosi, invece, sono quelli generati dagli scarti delle attività produttive. In questa tipologia vi rientrano per esempio i prodotti derivanti dalla raffinazione del petrolio, i prodotti chimici, i solventi, gli oli esausti, i materiali di scarto dell'industria fotografica e televisiva, i rifiuti dei laboratori di ricerca medica, degli impianti di trattamento dei rifiuti e dell'industria metallurgica.

Attraverso la Direttiva UE 851/2018 del *Pacchetto Economia Circolare,* sono state introdotte delle modifiche ad alcuni articoli della Direttiva CE 98/2008, in particolare quelli relativi ai rifiuti. Sono state introdotte modifiche all'art. 3, aggiungendo nuove definizioni per i rifiuti urbani e per i rifiuti non pericolosi. I rifiuti urbani (2ter) sono esclusi dai flussi di rifiuti provenienti dalle attività di produzione, per far sì che la distinzione da questi sia netta nella fase di gestione. È stata anche introdotta la definizione per i rifiuti non pericolosi (2bis), alla cui categoria appartengono tutti i rifiuti non contemplati nel punto 2 dell'art. 3 della Direttiva 98/2008.

Di particolare importanza è stata l'aggiunta dell'allegato IV bis riferito all'art. 4, paragrafo 3: "Esempi di strumenti economici e altre misure per incentivare l'applicazione della gerarchia dei rifiuti". Tra gli strumenti individuati si possono citare incentivi al riciclo attraverso tassazioni per il collocamento in discarica e incenerimento, incentivi pubblici volti ad implementare la raccolta differenziata e sostegni alla ricerca e innovazione tecnologica nel campo del riciclo.

Per quanto riguarda la responsabilità estesa del produttore (*EPR*), nell'art. 8a della nuova direttiva si introduce

la definizione di “Requisiti generali minimi in materia di responsabilità estesa del produttore”. Grazie a questi, gli Stati membri possono garantire che i produttori di beni abbiano la responsabilità sulla gestione finanziaria e organizzativa del ciclo di vita di un prodotto fino a che non diventa rifiuto, incentivando l’utilizzo di punti di raccolta differenziata esistenti e riducendo le dispersioni.

Attualmente, tutti i rifiuti sono inseriti in un elenco chiamato Catalogo Europeo dei Rifiuti (CER) e identificati attraverso una sequenza numerica a sei cifre. La prima catalogazione dei rifiuti risale al 1975 con la Direttiva CEE 442/1975 che li classificava in sedici gruppi da Q1 a Q16. Successivamente la Decisione CE 532/2000 ha introdotto il Codice CER con 839 voci, le quali sono state aumentate a 842 con la Decisione UE 955/2014.

I codici CER classificano il tipo di rifiuto in funzione del suo processo produttivo, e ciascun codice si compone di tre coppie di numeri: la prima identifica la macro-categoria con i numeri da 01 a 20, la seconda definisce il processo produttivo e la terza coppia, da 01 a 99, definisce univocamente il rifiuto. Per indagare il Codice CER bisogna procedere identificando prima l’appartenenza alla prima coppia, poi la seconda e poi la terza. Rientrano nell’elenco CER sia i rifiuti non pericolosi che quelli pericolosi, e questi ultimi vengono identificati nel codice attraverso l’uso di un asterisco (es. 13 02 07 *). È importante citare che l’inclusione di un determinato materiale all’interno di tale catalogo non preclude che esso possa essere re-immesso nel ciclo di produzione senza subire particolari trattamenti. Un esempio è la categoria dei sottoprodotti, materiali di scarto ottenuti dalle attività di produzione che possono essere riutilizzati nel corso dello stesso ciclo produttivo o in altri.

In merito al nostro ambito di ricerca, i materiali trattati nel processo sperimentale derivano dal riciclo di materassi post-consumo. Il materasso a fine vita *(End-Of-Life, EOL)* è classificato come rifiuto attraverso alcuni codici CER, in base alla loro origine:

- 20 03 07 – *Rifiuti urbani ingombranti;*
- 20 01 99 – *Altre frazioni non specificate altrimenti;*
- 19 12 12 – *Altri rifiuti prodotti dal trattamento meccanico dei rifiuti, diversi da quelli di cui alla voce 19 12 11 *.*

CODICE	DESCRIZIONE RIFIUTO
010000	RIFIUTI DERIVANTI DA PROSPEZIONE, ESTRAZIONE DA MINIERA O CAVA, NONCHÉ DAL TRATTAMENTO FISICO O CHIMICO DI MINERALI
010100	rifiuti prodotti dall'estrazione di minerali
010101	rifiuti da estrazione di minerali metalliferi
010102	rifiuti da estrazione di minerali non metalliferi
010300	rifiuti prodotti da trattamenti chimici e fisici di minerali metalliferi
010304 *	sterili che possono generare acido prodotti dalla lavorazione di minerale solforoso
010305 *	altri sterili contenenti sostanze pericolose
010306	sterili diversi da quelli di cui alle voci 01 03 04 e 01 03 05
010307 *	altri rifiuti contenenti sostanze pericolose prodotti da trattamenti chimici e fisici di minerali metalliferi
010308	polveri e residui affini diversi da quelli di cui alla voce 01 03 07
010309	fanghi rossi derivanti dalla produzione di allumina, diversi da quelli di cui alla voce 01 03 07
010399	rifiuti non specificati altrimenti
010400	rifiuti prodotti da trattamenti chimici e fisici di minerali non metalliferi

Fig. 6 Estratto da Allegato 1 del Catalogo Europeo Rifiuti (CER). Fonte: Supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale n. 288 del 10 dicembre 2010, D. Lgs. 205/2010.

Il codice 20 03 07 fa riferimento ai materassi che derivano dalle utenze domestiche e vengono definiti ingombranti per via delle loro dimensioni e dell'elevato peso. Al codice 20 01 99 corrispondono invece quei materassi che sono già stati introdotti nel processo di differenziazione dei rifiuti, separandone i materiali per composizione. Infine, al codice 19 12 12 corrispondono i materassi che sono stati sottoposti a trattamento meccanico, come il taglio e la triturazione, dopo il quale possono essere inseriti in un nuovo processo di produzione.

Si può osservare che i materassi non rientrano nella categoria dei rifiuti tessili (CER 19 12 08) in quanto la componente tessile è spesso limitata al rivestimento, mentre la maggior parte è costituita da materiali quali la schiuma di poliuretano, lattice e molle metalliche.

1.3 Materassi End-Of-Life

Con il termine *End-Of-Life (EOL)* associato ad un prodotto si intende un bene giunto a fine vita. Ciò accade quando il consumatore, dopo averlo utilizzato, decide di liberarsene perché non serve più al suo scopo, si è danneggiato oppure perché è divenuto obsoleto e decide di sostituirlo con un bene nuovo. Tali oggetti post-uso diventano quindi rifiuti. A questo punto entrano in gioco i processi relativi alla gestione dei rifiuti: il riciclo, il riuso o la rigenerazione, lo smaltimento in discarica o l'incenerimento.

I materassi post-consumo sono rifiuti difficili da smaltire, a causa del loro elevato ingombro e peso e, soprattutto, perché sono composti da materiali non degradabili che generano grandi volumi di rifiuti nelle discariche. Un materasso matrimoniale ha generalmente dimensioni pari a 160x190 cm e pesa circa 30 kg. Per questi motivi, la raccolta, il trasporto e anche il riciclo dei materassi raggiungono costi molto elevati, portando a frequenti e spiacevoli fenomeni di abbandono illegale.

Fig. 7 Struttura interna di un materasso a molle tradizionale in poliuretano espanso. Fonte immagine: Milano Bedding, https://store.milanobedding.com/it/materasso-molle-antiacaro-anatomico.html

L'*International Sleep Produtcs Association* (ISPA), un'associazione internazionale con sede in Virginia (USA), composta dai più grandi produttori di materassi, ha l'obiettivo di far progredire l'industria dei prodotti per il sonno e promuovere leggi a livello statale e federale, che tutelino i produttori e i consumatori di questi prodotti. L'*ISPA* gestisce la rivista mensile *BedTimes*, la quale ha annunciato che nel 2010 in Europa sono stati prodotti 30 milioni di materassi EOL. Il 60% di questi è stato smaltito in discarica, mentre il 40% è stato portato agli inceneritori per produrre energia termica.[9]

Negli Stati Uniti questi dati hanno spinto i Governi ad emanare leggi EPR sui materassi, con l'obiettivo di ridurre gli impatti di questi prodotti sull'ambiente e per spostare l'onere finanziario dello smaltimento dai governi locali ai produttori stessi. Tali leggi sono state adottate nel 2013 dagli Stati della California, del Connecticut e del

9 R. Geyer, B. Kuczenski, M. Trujillo, *Assessing the greenhouse gas Savings potential of extended producer responsibility for mattresses and boxsprings in the United States*", Journal of Industrial Economy, vol. 20 parte 4 (2016), pp. 917-928.

Rhode Island.[10]

Tra le normative nazionali in fase istruttoria, vi è uno schema di regolamento che è stato redatto nel dicembre 2017 dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM), durante un incontro con alcune aziende che si occupano della produzione di materassi e gestione di questi a fine vita. Questo schema, riferito all'art. 178-bis del D. Lgs. 152/2006 che tratta l'argomento della Responsabilità Estesa al Produttore (*EPR*), raccoglie alcune direttive per le aziende al fine di ridurre gli impatti ambientali causati dall'attuale progettazione e produzione di materassi e dalla loro gestione post-consumo. Il documento, però, non fornisce dei vincoli normativi o linee guida su specifiche modalità di riciclo dei materassi e dei suoi componenti. Tutt'al più svolge il compito di evidenziare la mancanza di un coordinamento per la gestione di rifiuti particolari come materassi, divani e altri imbottiti ingombranti.

Nonostante l'industria del riciclo dei materassi non sia molto conveniente economicamente, negli Stati Uniti e in Europa sono nate numerose aziende che hanno iniziato ad occuparsi della loro raccolta per poter riciclare i materiali di cui sono composti. Aziende come la *Kastrup Recycling* in Germania[11], la *Recyc-Matelas la Secondly* in Francia[12] e la *Cormatex Srl* in Italia[13], si occupano oggi di riciclare materassi EOL.

Un materasso a molle tradizionale è composto da tre parti: il corpo principale, di circa 20 cm di spessore, costituito da uno o più strati di schiuma flessibile di poliuretano, le molle in acciaio che fungono da sostegno e la fodera esterna in tessuto (Fig. 7).

La *Recyc-Matelas*, con un quantitativo di 30.000 materassi riciclati all'anno, dichiara di riuscire a separare e riciclare il 92% dei materiali che li compongono. I materiali ottenuti dal riciclo sono riportati di seguito (Fig. 8):[14]

10 *Op. cit.*
11 *Kastrup Recycling*, https://www.kastrup-recycling.de/
12 *Recyc-Matelas*, http://www.recyc-matelas.com/fr
13 *Cormatex,* http://www.cormatex.it/
14 Recyc - Matelas, *La fibre éco,* http://www.recyc-matelas.fr/PDF/plaquette.pdf

- Schiuma di poliuretano 23%
- Acciaio 18%
- Lattice 11%
- Tessuti misti 10%
- Poliestere 8%
- Feltro 8%
- Scarti 8%
- Legno 7%
- Lana 5%
- Cotone 2%

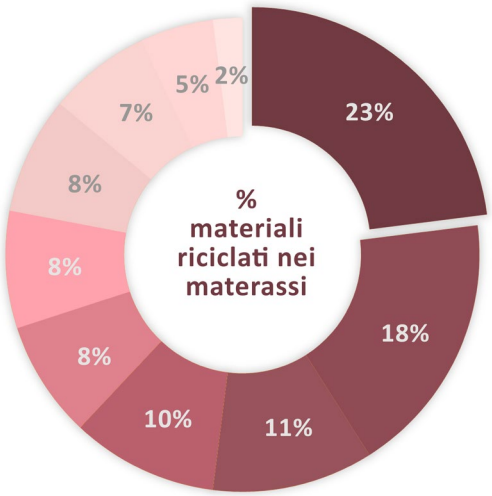


Fig. 8 Percentuali di materiali riciclati contenuti nei materassi da Recyc-Matelas. Fonte dati: Recyc - Matelas, *La fibre éco.*

Tali materiali sono, infatti, buoni isolanti termo-acustici e possono essere reimpiegati in molti settori come l'edilizia, l'*automotive* o altre applicazioni industriali, rimuovendo dalle discariche importanti quantità di materiale che altrimenti non sarebbe sfruttato.

Il processo di riciclo dei materassi si compone di cinque passaggi:

1. Apertura materasso: un operatore taglia la fodera con un cutter;
2. Estrazione molle: una macchina estrae le molle in acciaio dal materasso, ancorandole e tirandole (Fig. 9);
3. Separazione materiali: gli operatori separano ogni strato del materasso in base ai materiali;
4. Taglio: ogni strato viene tagliato in pannelli di dimensioni standard oppure triturato in piccoli pezzi, passando attraverso delle seghe automatiche;
5. Pressatura e imballaggio: i materiali ricavati vengono pressati da una macchina e imballati, pronti per essere spediti.

Fig. 9 Estrazione delle molle di metallo dai materassi. Fonte immagine: N. César, *Troisième plateforme de recyclage de matelas pour Recyc-Matelas Europe,* L'Usine Nouvelle (2015).

I materiali ottenuti da questo processo sono spediti a specifiche aziende di riciclaggio che lavorano ulteriormente gli scarti per ottenere nuovi prodotti a seconda del materiale di partenza. La schiuma flessibile di poliuretano è riutilizzabile come isolante termico in edilizia o nel settore dell'auto per realizzare nuovi sedili o imbottiture, il feltro e gli scarti tessili sono recuperati per produrre tappetini o imbottiture, le molle in acciaio sono inviate alle fonderie, mentre gli scarti in legno vengono utilizzati per produrre nuovi pannelli oppure bruciati come biomassa per ottenere calore.

POLIURETANO

PUR

2.1 Produzione di materie plastiche

I prodotti polimerici rappresentano il terzo materiale più prodotto al mondo, dopo il cemento e l'acciaio. Alcuni scienziati americani hanno condotto una ricerca sulla produzione, consumo e riciclo delle materie plastiche, stimando che dal 1950 ad oggi sono state prodotte 8,3 miliardi di tonnellate di plastica.[15]

PlasticsEurope ha pubblicato nel report annuale *Plastics – The Facts 2017* un'analisi sulla produzione mondiale di materie plastiche, riferita all'anno 2016. In questa analisi si riscontra che, tra i maggiori produttori al mondo, la Cina detiene il primato coprendo ben il 29% della produzione, portando il continente asiatico al primo posto con un totale di 50%. Segue l'Unione Europea con un livello di produzione pari al 19% e i paesi aderenti al NAFTA (*North American Free Trade Agreement*), ossia Stati Uniti, Canada e Messico, con il 18%.[16]

Nel 2015, la produzione di materie plastiche a livello mondiale ha raggiunto la quota di 380 milioni di tonnellate.[17] Il seguente grafico mostra le varie percentuali dei materiali plastici prodotti nel mondo (Fig. 10). Il polietilene (PE), alle diverse densità, è il più prodotto, ricoprendo il 36% del totale, e viene impiegato per realizzare contenitori, bottiglie, giocattoli e pellicole alimentari. A seguire, il polipropilene (PP) con il 21%, viene utilizzato nella produzione di tubi, contenitori per microonde, parti interne di automobili e tessuti sintetici per abbigliamento. Il PVC, invece, con una percentuale di produzione pari al 12% è impiegato per tubi, telai di serramenti, rivestimenti per cavi elettrici, pavimenti e pareti. Con un livello di produzione inferiore al 10% cadauno, si attestano i prodotti a base di polietilene tereftalato, poliuretano e polistirene. Il PET è il tipo di plastica più utilizzato per produrre bottiglie, mentre il polistirene (PS) si utilizza per produrre isolanti termici e contenitori. Il poliuretano (PU o PUR) è impiegato nelle sue diverse forme e densità per la produzione di materiali isolanti in edilizia, negli elettrodomestici e per le imbottiture di materassi, divani e automobili.

15 R. Geyer, J. R. Jambeck, K. L. Law, *Production, use, and fate of all plastics ever made*, Science Advances, vol. 3 parte 7 (2017).
16 PlasticsEurope, EPRO, *Plastics – the Facts 2017* (2018).
17 R. Geyer, *op. cit.*

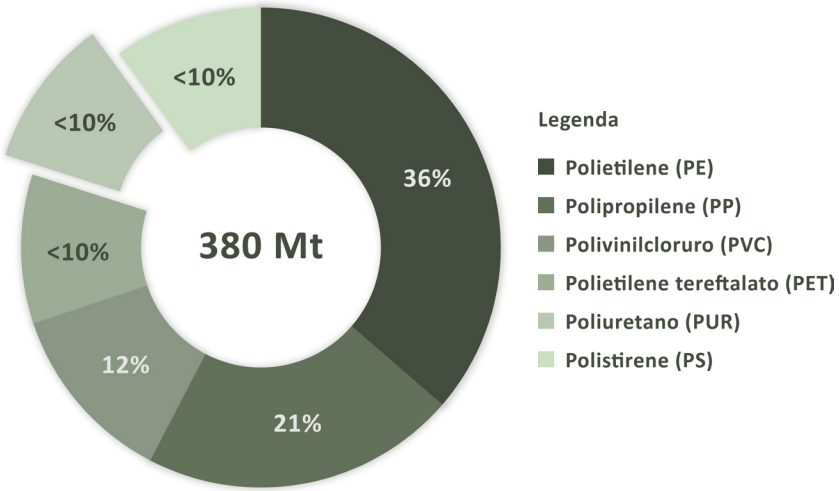


Fig. 10 Grafico delle % di materie plastiche prodotte nel mondo nel 2015. Fonte dati: R. Geyer, J. R. Jambeck, K. L. Law, *Production, use, and fate of all plastics ever made*, Science Advances, vol. 3 parte 7 (2017).

2.2 Poliuretano: tipologie e applicazioni

Il poliuretano (PUR) è un materiale plastico appartenente alla famiglia dei polimeri costituito da legami uretanici NH-(CO)-O. È un prodotto di sintesi ottenuto dalla reazione tra di-isocianati (aromatici o alifatici) e polioli (esteri o eteri). A seconda del prodotto finale desiderato, la composizione base può essere implementata con altri ingredienti quali catalizzatori, agenti espandenti e ritardanti di fiamma. Il poliuretano rientra nella categoria dei polimeri termoindurenti, i quali, a differenza dei termoplastici, se sottoposti ad una fonte di calore elevata e poi raffreddati, non tornano malleabili ma carbonizzano. Questo comportamento irreversibile, dovuto ai forti legami di reticolazione, rende difficile il processo di riciclo.

I poliuretani rappresentano oggi uno dei materiali più versatili al mondo grazie alle loro numerose proprietà:

- Durabilità nel tempo: deperiscono difficilmente e le schiume rigide hanno una vita utile superiore ai 50 anni;[18]
- Resistenza meccanica: hanno un'elevata resistenza ai carichi, alle abrasioni e agli urti. Se sottoposti a carichi pesanti subiscono deformazioni elastiche;
- Resistenza al calore e al freddo, con comportamento stabile alle variazioni di temperatura;
- Resistenza agli agenti atmosferici e agli ambienti umidi: non sono soggetti all'attacco da parte di muffe e

18 ActionGiromari, *Poliuretano: caratteristiche e applicazioni*.

batteri (ad eccezione delle schiume morbide);

- Flessibilità;
- Resistenza agli agenti chimici e all'acqua;
- Isolamento termico, acustico ed elettrico;
- Compatibilità con altri materiali, quali legno, plastica e metalli;
- Leggerezza: la matrice porosa contiene grandi quantità di aria che ne riduce sensibilmente il peso;
- Accessibilità: presente in commercio in fasce di prezzo contenute.

Dalle proprietà sopra citate scaturiscono vantaggi e svantaggi. Tra i vantaggi si possono elencare la possibilità di ottenere prodotti in forme e colori differenti, grazie alla plasmabilità durante la lavorazione e alla semplicità di trattamento delle superfici. Un aspetto rilevante è la sua riciclabilità attraverso diverse tecniche che ne consente il riutilizzo a fine vita. Come tutte le materie plastiche, essendo un derivato degli idrocarburi fossili, è un materiale che reagisce al fuoco, limitandone alcuni campi di applicazione. Nonostante il suo prezzo sia accessibile sul mercato, il processo di produzione è complesso ed impattante dal punto di vista energetico ed ambientale.

I prodotti poliuretanici possono distinguersi in differenti tipologie, mediante la combinazione in diverse percentuali dei loro precursori, che ne determinano flessibilità o rigidità. Un'altra caratteristica che varia in funzione dell'applicazione è la densità (misurata in kg/m^3), conferita dalla quantità di agente espandente impiegato durante la produzione. Il valore della densità suddivide i materiali in prodotti a bassa o alta densità. Quelli a bassa densità, con valori da 20 a 60 kg/m^3 circa, trovano impiego nel campo dell'isolamento termico soprattutto grazie alla bassa conducibilità, con applicazioni in edilizia, negli elettrodomestici e nel settore automobilistico.

I prodotti ad alta densità (da 80 a 500 kg/m^3 circa), avendo una maggiore resistenza meccanica, possono essere impiegati come rivestimenti di pavimentazioni e coperture e per la creazione di oggetti di design.

Tra i poliuretani più noti in commercio si riscontrano:

- schiume rigide e flessibili;
- elastomeri;
- adesivi, sigillanti e vernici;
- rivestimenti;
- fibre.

Il grafico seguente (Fig. 11) mostra l'andamento dei consumi di prodotti poliuretanici nel mondo, nell'anno 2016:

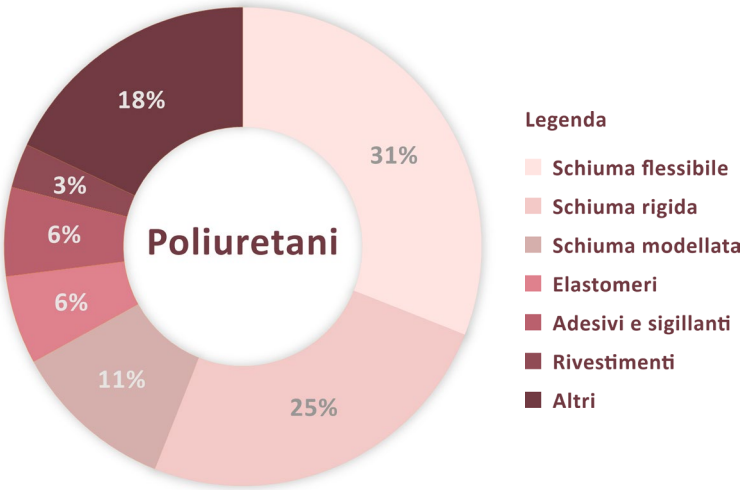


Fig. 11 Grafico a torta delle % di consumo delle diverse tipologie di poliuretano nel mondo nel 2016. Fonte dati: Plastics Insight, *Polyurethane Properties, Production, Price, Market, and Uses*.

Le schiume poliuretaniche sono i prodotti a più largo consumo e si ottengono dalla combinazione di isocianati e polioli, che, reagendo, liberano dei gas dando origine alla struttura porosa.

Le schiume rigide presentano una buona resistenza meccanica e agli agenti chimici, non si decompongono e possono resistere ad alte temperature. La loro produzione interessa i campi edile, automobilistico, aeronautico e navale.

Le schiume flessibili e modellate, avendo una struttura cellulare aperta che permette di incorporare aria nei pori, sono note per la loro leggerezza e il potere isolante. Sono comunemente utilizzate, a seconda della densità, nelle imbottiture di materassi, divani e arredi, sedili per auto o per isolanti termici.

Gli elastomeri poliuretanici sono polimeri termoplastici costituiti da strutture lineari o reticolate, la cui principale peculiarità è di sopportare grandi deformazioni elastiche. Essi hanno una consistenza gommosa e si

distinguono in tre categorie: elastomeri termoplastici, gomme poliuretaniche e elastomeri per stampaggio.

Gli elastomeri termoplastici sono impiegati nella produzione di suole di scarpe, adesivi, isolamento di cavi elettrici e negli elettrodomestici. Sono anche adatti ad applicazioni sanitarie grazie alla loro morbidezza. Hanno potere fonoassorbente e buona resistenza all'abrasione e alle basse temperature.

Le gomme poliuretaniche sono prodotte tramite addizione di agenti vulcanizzanti come zolfo e perossidi che ne migliorano la durabilità nel tempo. Questi sono materiali termoindurenti e sono adatti ad applicazioni soggette ad alte temperature. Sono compatibili, inoltre, con solventi e lubrificanti. Le tecniche di produzione di questi materiali sono l'estrusione, lo stampaggio per iniezione e la calandratura.

Gli elastomeri per stampaggio sono ottenuti con l'aggiunta di estensori di catena e sono impiegati nelle pavimentazioni di impianti sportivi, nell'industria meccanica e automobilistica.

Gli adesivi poliuretanici sono adesivi strutturali impiegati come elementi di giunzione, grazie alla loro capacità di subire deformazioni elastiche e sopportare sollecitazioni meccaniche e pressioni. Sono resistenti all'acqua e possono essere impiegati per usi esterni.

I sigillanti poliuretanici sono resine poliuretaniche monocomponente ad elevata adesione, compatibili con innumerevoli materiali, quali calcestruzzo, metalli, laterizi, pietra e legno. Il loro principale impiego è come sigillanti di giunti e fori.

Le vernici poliuretaniche sono resine che polimerizzano a contatto con l'aria in tempi brevi. Prodotte in polveri, sono applicabili elettrostaticamente su superfici riscaldate, sulle quali polimerizzano. Sono particolarmente consigliate per prodotti soggetti ad usura e che richiedono finiture esteticamente accurate. Sono impiegati nella verniciatura di legni e metalli nel restauro e nell'industria navale.

I rivestimenti poliuretanici sono impiegati nei pavimenti destinati a forte usura, grazie alla forte resistenza all'abrasione e al deterioramento. Possiedono una buona resistenza all'azione dei raggi ultravioletti, conservando il colore e le proprietà estetiche.

Le fibre poliuretaniche sono largamente impiegate nel settore tessile e dell'abbigliamento, avendo proprietà differenti a seconda della tecnica con cui sono prodotte e lavorate. Si può citare come esempio lo spandex, una fibra di poliuretano impiegata per elasticizzare i tessuti, conosciuta come *Lycra®*, il nome del marchio commerciale registrato.

Il seguente grafico mostra la richiesta di prodotti a base di poliuretano nel mondo, per ciascun settore di applicazione, riferiti all'anno 2016 (Fig. 12).

Con un ammontare complessivo di 16 milioni di tonnellate richieste nel 2016,[19] i prodotti poliuretanici trovano maggiore impiego nel settore dell'arredamento, con 5,3 milioni di tonnellate prodotte. Infatti, sono largamente usati nelle imbottiture di mobili e materassi, come confermato dai dati di produzione delle schiume flessibili e rigide. Il secondo settore che registra un elevato impiego di prodotti poliuretanici è quello delle costruzioni, quasi al pari con quello degli elettrodomestici (rispettivamente 2 Mt e 1,6 Mt), che sfruttano il potere isolante del materiale. Grazie alla loro versatilità, trovano impiego in moltissimi settori in quantità minori, ma che, se sommate, raggiungono quasi i 6 milioni di tonnellate.

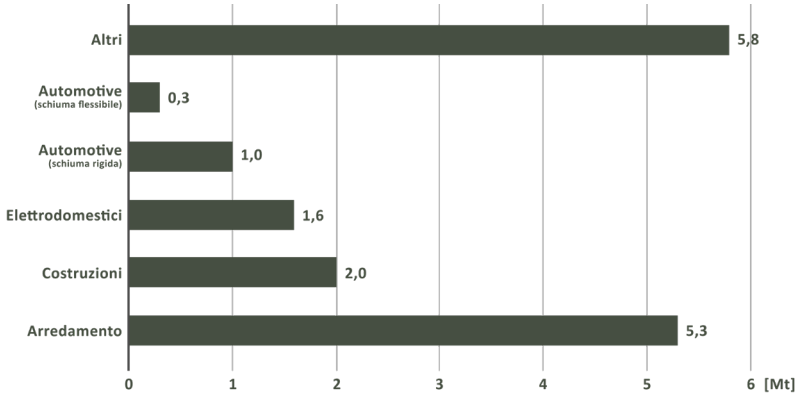


Fig. 12 Grafico della domanda di prodotti poliuretanici nel mondo, suddivisi per settore, nell'anno 2016. Fonte dati: Plastics Insight, *Polyurethane Properties, Production, Price, Market, and Uses.*

19 Plastics Insight, *Polyurethane Properties, Production, Price, Market, and Uses*, https://www.plasticsinsight.com/resin-intelligence/resin-prices/polyurethane/

2.3 Schiuma flessibile di poliuretano

2.3.1 Composizione

I poliuretani sono generalmente prodotti dosando e miscelando due o più flussi di componenti liquidi, contenenti precursori del poliuretano e altri additivi. La schiuma flessibile di poliuretano è prodotta facendo reagire diisocianati di toluene con polioli polieteri. Entrambi sono prodotti derivati dal petrolio greggio, il cui processo produttivo verrà approfondito nel paragrafo successivo.

I polioli polieteri costituiscono il più grande gruppo di polioli utilizzati nella produzione di schiume poliuretaniche e sono composti polimerici contenenti gruppi eteri (R-O-R) e gruppi ossidrilici (-OH). Esistono due tipologie di polioli polieteri: i polioli polieteri a catena corta, con peso molecolare inferiore a 1000 g/mol, e i polioli polieteri a catena lunga, con peso molecolare superiore a 1000 g/mol. Quelli a catena corta si presentano in forma liquida, mentre quelli a catena lunga in forma solida cerosa.

I polioli polieteri sono combinati con i diisocianati aromatici per produrre schiume poliuretaniche. I polioli polieteri a catena corta vengono fatti reagire con il difenilmetano diisocianato (MDI) per produrre schiume rigide, mentre i polioli polieteri a catena lunga combinati con il toluene diisocianato (TDI), creano schiume flessibili.

I diisocianati sono composti contenenti due gruppi di isocianato (gruppo funzionale -N=C=O). Tra i diisocianati aromatici esistenti, quelli più comuni, utilizzati nella produzione di schiume di poliuretano, sono il toluene diisocianato (TDI) e il difenilmetano diisocianato (MDI). Il TDI è utilizzato principalmente nella produzione industriale di schiume poliuretaniche flessibili mentre il MDI è impiegato per produrre schiume poliuretaniche rigide, flessibili o elastomeriche.

A seconda del prodotto e delle caratteristiche che si vogliono ottenere, i diisocianati e i polioli vengono miscelati in quantità differenti, con aggiunta di additivi. Particolare attenzione viene posta alla presenza o assenza di ritardanti di fiamma (FR).

Le quattro tipologie più comuni di schiuma flessibile di poliuretano sono le seguenti:[20]

- Schiuma PUR a base TDI senza FR, densità 18 - 25 kg/m³, resistenza a compressione 2,5 - 4 kPa;
- Schiuma PUR a base TDI senza FR, densità 35 - 40 kg/m³, resistenza a compressione 3,8 - 5 kPa;
- Schiuma PUR a base TDI con FR, densità 40 - 54 kg/m³, resistenza a compressione 2,5 - 4 kPa;
- Schiuma viscoelastica PUR a base di MDI senza FR, densità 45 - 53 kg/m³, resistenza a compressione 2,5 - 4 kPa.

La schiuma flessibile di poliuretano è utilizzata per produrre materassi e imbottiture, ma anche pannelli isolanti acustici, spugne per la casa, abbigliamento sportivo, imballaggi e in molte altre applicazioni. In particolare, le tipologie a base di TDI a bassa densità sono utilizzate per l'isolamento, l'imballaggio, l'edilizia e le calzature, mentre quelle a densità maggiore sono preferite per imbottire mobili e letti. Le schiume a base di MDI sono sempre più utilizzate per produrre i materassi in *memory foam,* in quanto grazie alle loro proprietà viscoelastiche sono in grado di adattarsi alla forma del corpo e alleviare la pressione.

2.3.2 Processo produttivo

In questo paragrafo è riportato il processo produttivo della schiuma poliuretanica flessibile, a partire dalle materie prime estratte, esplicando in maniera sintetica i vari passaggi intermedi. Tutti i precursori del poliuretano hanno origine da idrocarburi fossili, quali petrolio greggio e gas naturale (Fig. 13).

Il petrolio greggio, una volta estratto, viene preriscaldato e convogliato nella torre di frazionamento, dalla quale fuoriescono, in base alla temperatura, composti a differente numero atomico. La nafta, ottenuta nell'intervallo di temperatura tra 100 °C e i 200 °C,[21] viene successivamente raffinata e desolforata. Una porzione di questa è condotta, insieme al gas naturale, verso il processo di *steam cracking* per produrre etilene, mentre un'altra subirà il trattamento di *reforming* catalitico dal quale si otterrà toluene. L'etilene e il toluene sono gli elementi base per la produzione dei precursori del poliuretano.

20 Europur, *Environmental Product Declaration - Flexible Polyurethane (PU) Foam* (2015), p. 9.
21 I. Boustead, *Eco-profiles of the European Plastics Industry. Naphtha* (Marzo 2015), p. 6.

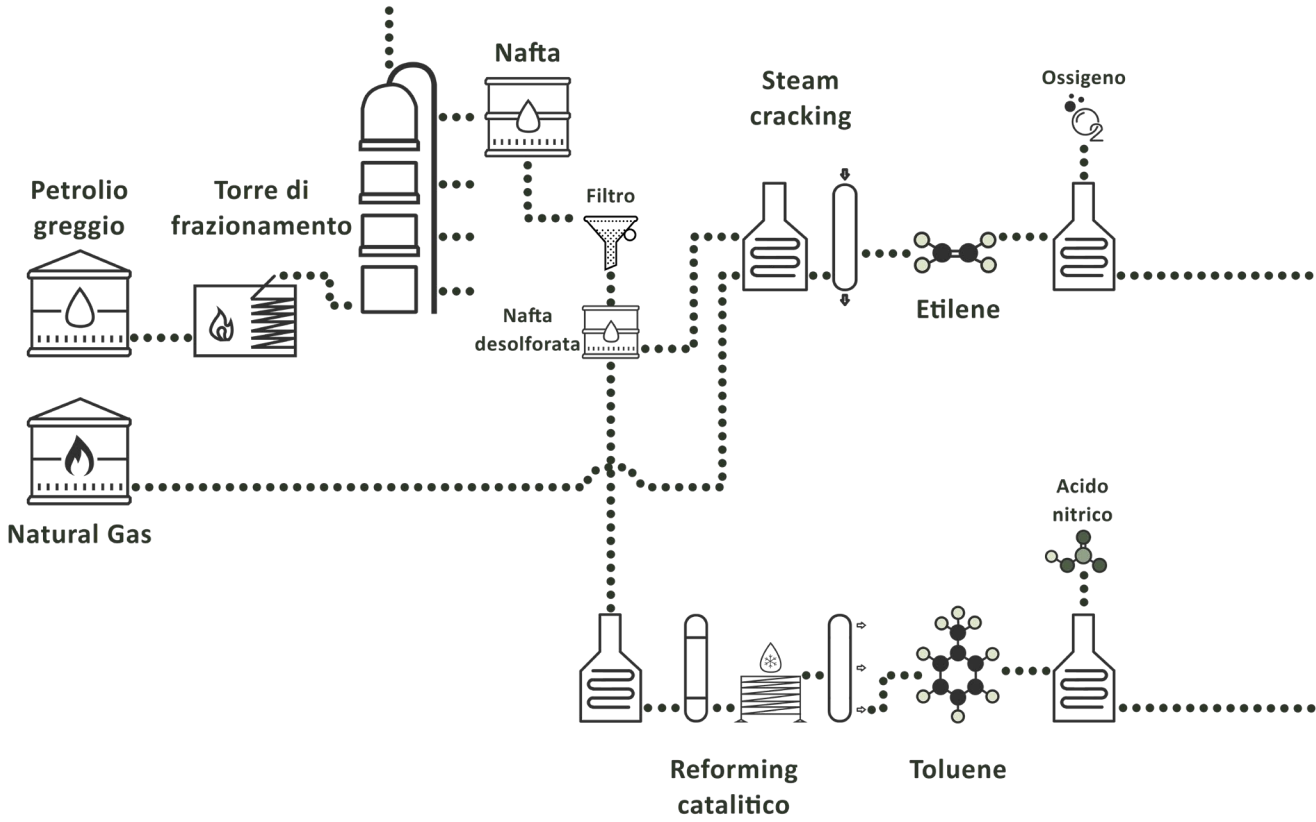
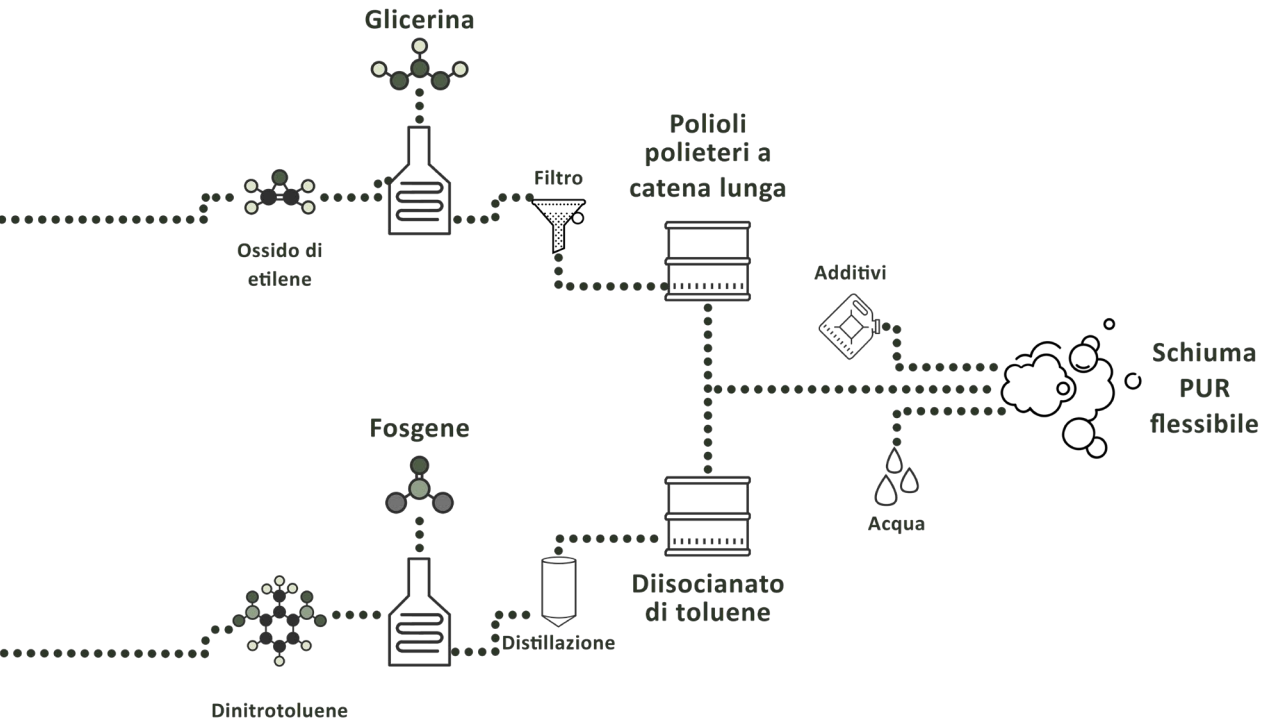


Fig. 13 Schema del processo di produzione della schiuma flessibile di poliuretano.


Glicerina
Ossido di etilene
Filtro
Polioli polieteri a catena lunga
Additivi
Schiuma PUR flessibile
Acqua
Fosgene
Diisocianato di toluene
Distillazione
Dinitrotoluene

Lo *steam cracking* è un trattamento che permette di rompere i legami dei composti attraverso la pirolisi, per ottenere idrocarburi leggeri. La nafta e il gas naturale, insieme al vapore acqueo, sono immessi in un ambiente controllato e riscaldati ad una temperatura di circa 850 °C[22] per poi subire un brusco raffreddamento. Questo comporta la creazione di vari composti a più basso peso molecolare, tra i quali il principale prodotto è l'etilene (circa il 35%).[23]

Il processo di *reforming* catalitico, invece, avviene all'interno di tre o quattro reattori posti in serie, all'interno dei quali la nafta viene riscaldata a circa 500 °C[24] a pressioni molto elevate. I prodotti di reazione sono condensati per separare l'idrogeno e i gas generati. Gli idrocarburi aromatici ottenuti sono quindi sottoposti a distillazione frazionata, ottenendo così toluene, benzene e xilene.

L'etilene ottenuto dal *cracking* subisce successivamente un trattamento di alcossilazione attraverso un catalizzatore (solitamente idrossido di potassio), trasformandosi in ossido di etilene. Quest'ultimo è miscelato in un reattore alla temperatura di circa 100 - 130 °C e alla pressione di 2 - 5 bar circa[25] con un iniziatore, come la glicerina, o altri carboidrati, come il saccarosio. Per rimuovere il catalizzatore dal composto finale, si introduce un acido, che genera sali insolubili, facilmente rimovibili attraverso un filtro. Gli altri sottoprodotti sono invece eliminati tramite distillazione. Si ottengono così i polioli polieteri a catena corta o lunga, a seconda del peso molecolare.

Miscelando il toluene con l'acido nitrico, si ottiene il prodotto intermedio dinitrotoluene (DNT), il quale è sottoposto a idrogenazione (reazione con l'idrogeno) dando origine al diamminotoluene (TDA). Il TDA è trattato a temperature e pressioni controllate con fosgene, derivato dalla reazione tra cloro e monossido di carbonio. La fosgenazione del TDA risulta in una miscela di diisocianato di toluene (TDI) con tracce di fosgene e acido cloridrico, che vengono eliminate in seguito tramite distillazione.

---

22 J. P. V. de Freitas Moreira, *Steam Cracking: Kinetics and Feed Characterisation*, Técnico Lisboa, Chemical Engineering (2015), p. 64.
23 *Op. cit.*, p. 63.
24 G. Barone, *Approfondimento I - I prodotti dell'industria petrolifera: benzine*, Università Federico II di Napoli, Dipartimento Tecnologie Energetiche, p. 1.
25 ISOPA, *Long and Short-chain Polyether Polyols for Polyurethane Products* (Aprile 2012), p. 9.

Le aziende produttrici di schiume poliuretaniche generalmente non sono le stesse che realizzano i precursori, a causa della loro varietà e complessità del processo produttivo. Per questo motivo non è semplice ricavare dati relativi alle quantità delle materie prime utilizzate, mentre una composizione ipotetica della schiuma viene fornita dalla Dichiarazione Ambientale di Prodotto (EPD) pubblicata da *PlasticsEurope*. I dati derivano da sette produttori di schiuma poliuretanica, aventi sede in Europa, che nel 2013 hanno coperto il 60% della produzione europea di schiuma PUR flessibile.[26]

Per ottenere un'unità funzionale di 1 kg di schiuma flessibile di poliuretano sono necessari:[27]

Composizione	**Quantità**
Polioli polieteri a catena lunga	0,713 kg
Diisocianato di Toluene (TDI)	0,285 kg
Acqua	0,021 kg
	1,000 kg

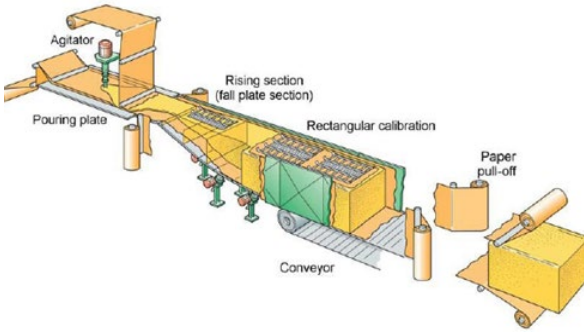


Fig. 14 Rappresentazione di un sistema di produzione continua di blocchi regolari in schiuma flessibile di poliuretano. Fonte immagine: Europur, *Environmental Product Declaration - Flexible Polyurethane (PU) Foam* (Agosto 2015), p. 10.

Questi prodotti sono immessi in un miscelatore e, reagendo tra loro, producono una schiuma, la cui densità varia a seconda degli additivi aggiunti. Gli additivi, come catalizzatori, tensioattivi, pigmenti, ritardanti di fiamma, ecc., sono aggiunti in quantità inferiori all'1 - 2%[28] e consentono, inoltre, di regolarne la porosità e modificarne le proprietà. La miscela di schiuma è versata su un nastro trasportatore orizzontale all'interno di un tunnel ventilato, che aspira i gas prodotti dalla reazione di schiumatura e ne contiene l'espansione. Terminata la reazione, si ottiene una lastra continua delle dimensioni del tunnel, che è poi tagliata della lunghezza richiesta.

26 Europur, *Environmental Product Declaration - Flexible Polyurethane (PU) Foam* (Agosto 2015), p. 41.
27 I. Boustead, *Eco-profiles of the European Plastics Industry. Polyurethane flexible foam* (Marzo 2005), p. 7.
28 I. Boustead, *Eco-profiles of the European Plastics Industry. Polyurethane rigid foam* (Marzo 2005), pp. 4-5.

2.4 Riciclo a fine vita

2.4.1 Tecniche di riciclo

Come si evince dalle analisi nei precedenti paragrafi, la produzione del poliuretano comporta alti valori di complessità e di risorse impiegate. Ad aggravare l'impatto che questo materiale ha sull'ambiente, si aggiunge l'ingombro generato nelle discariche dai prodotti a fine vita. La vita utile dichiarata superiore ai 50 anni, che fa prediligere questo materiale rispetto ad altri, diventa uno svantaggio al momento dello smaltimento.

A seguito di queste riflessioni, il riciclo dei prodotti poliuretanici offre nuove opportunità di reimpiego delle risorse che altrimenti andrebbero perse. Molte aziende che lavorano il poliuretano si sono attivate per raggiungere questo scopo, trasformando i prodotti a fine vita in materia prima seconda.

L'ISOPA, l'associazione europea dei produttori di diisocianati e polioli, fornisce delle schede illustrative per i produttori e i consumatori sui singoli processi di riciclo sperimentati finora. Questo permette di confrontare i vari processi, valutandone i vantaggi e gli svantaggi, in chiave sia economica che ambientale. Le tecniche di riciclo individuate sono le seguenti (Fig. 15):

- Riuso;
- Riciclo meccanico;
- Riciclo chimico;
- Riciclo termico;
- Recupero di energia.

Il riuso o la riparazione possono essere previsti per tutti i prodotti di lunga durata, ma qualora l'integrità del prodotto venga meno e le proprietà del materiale restino inalterate, si può prevedere un processo di riciclo.

Il riciclo meccanico è il processo più utilizzato per il riciclo delle materie plastiche, perché prevede lavorazioni

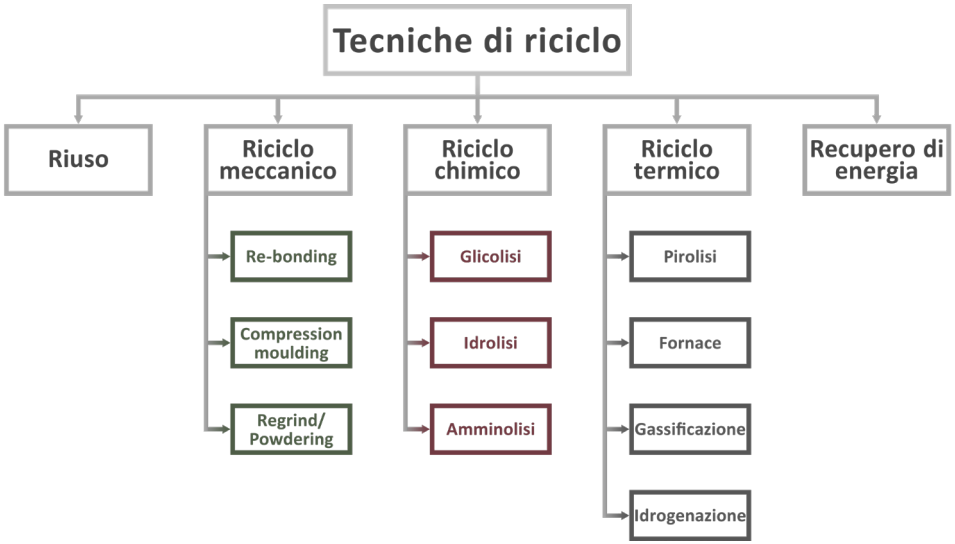


Fig. 15 Tecniche di riciclo del poliuretano a fine vita. Fonte dati: ISOPA, *Fact Sheet - Recycling and Recovering Polyurethanes. Options in practise* (Novembre 2005), p. 2.

semplici ed è il più conveniente sotto l'aspetto economico. Le operazioni previste sono separazioni, triturazioni e macinazioni, addensamenti, lavaggi, granulazioni ed estrusioni.

Le tecniche con le quali si applica il riciclo meccanico sono:

- *Re-bonding;*
- *Compression moulding;*
- *Regrind/powdering.*

La tecnica *re-bonding* è un processo di riciclo meccanico che prevede la triturazione e la successiva ricomposizione della schiuma flessibile, grazie ad un legante poliuretanico, in lotti o in produzione continua. Per descrivere questa tecnica, di seguito si riporta il processo di riciclo impiegato dall'azienda francese *Secondly* per realizzare il pannello studiato in questa tesi (Fig. 16).

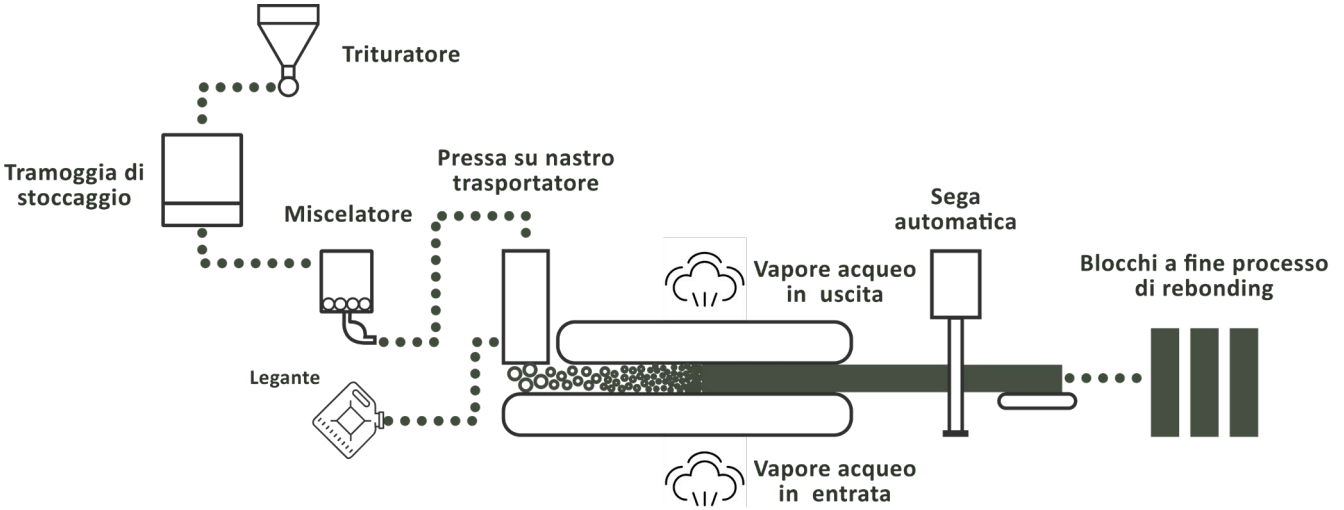


Fig. 16 Schema di riciclo meccanico della schiuma flessibile di poliuretano secondo la tecnica di re-bonding a stampaggio continuo. Fonte dati: ISOPA, *Fact Sheet - Recycling and Recovering Polyurethanes. Rebonded Flexible Foam* (Giugno 2001), p. 1.

Il primo step prevede la suddivisione per tipologia dei materiali post-consumo e degli scarti di lavorazione industriale (Fig. 17a). Un trituratore riduce la schiuma in piccoli pezzi di circa un centimetro di diametro,[29] mentre i tessuti sono sfilacciati (Fig. 17b); il tutto è poi inviato ad una tramoggia di stoccaggio. I pellet sono quindi convogliati alla pesatura per mezzo di condotti ad aria (processo *airlay*) che permettono di inserire nel nuovo materassino le quantità prestabilite di ciascun materiale. Una volta pesati, i materiali sono inviati in un miscelatore nel quale viene aggiunto, tramite ugelli, il legante. Esso è un pre-polimero poliuretanico che si attiva per mezzo del calore e del vapore acqueo. Nella fase seguente, i materiali triturati sono depositati su un nastro trasportatore che passa attraverso una pressa a caldo, he conferisce loro la forma. Durante la fase di fissaggio, che avviene alla temperatura di 160 °C, il vapore nebulizzato attiva il legante e il prodotto finito esce sottoforma di lastra continua che viene progressivamente tagliata (Fig. 17c).

L'alternativa allo stampaggio continuo è lo stampaggio per lotti, nel quale la miscela di schiuma triturata e legante è compressa, alla densità desiderata, da un pistone idraulico in uno stampo rettangolare. All'interno dello

29 ISOPA, *Fact Sheet - Recycling and Recovering Polyurethanes. Rebonded Flexible Foam* (Giungo 2001), p. 2.

Fig. 17 Fasi della tecnica di re-bonding:
a) separazione dei materiali; b) triturazione; c) taglio dei materassini. Fonte immagini: *Secondly,* http://www.secondly.fr/transformer.

stampo, durante la pressatura, il vapore acqueo introdotto attiva il legante, ottenendo così un blocco unico. Dopo la polimerizzazione, lo stampo può essere aperto e il blocco lasciato asciugare. La fase finale prevede il taglio del blocco in pannelli delle dimensioni richieste, con l'ausilio di una sega automatica.

Le proprietà della schiuma legata possono variare in funzione della tipologia di schiuma di partenza, della dimensione dei pellet triturati e della densità finale. Ovviamente, il tipo di legante utilizzato e il rapporto tra schiuma e legante aggiunto, giocano un ruolo fondamentale sulla qualità del prodotto rigenerato.

Lo stampaggio a compressione (*compression moulding)* consiste nell'inserire il polimero in uno stampo riscaldato che, grazie alla forte pressione e al calore, permette di ottenere oggetti di forma complessa e molto grandi. Il poliuretano post-consumo è macinato finemente da un trituratore e, dopo una fase di preriscaldamento, è inserito in quantità precise in uno stampo in acciaio. Un pistone idraulico chiude la matrice e comprime il materiale sulle pareti dello stampo, il quale fonde e per mezzo di elevate pressioni, polimerizza prendendo perfettamente la forma della matrice. Raffreddato lo stampo, eventualmente con l'ausilio di distaccanti, l'oggetto è rimosso dalla matrice, lasciato raffreddare e rifilato delle parti in eccesso.

Questa tecnica è ampiamente utilizzata nel settore delle auto per la produzione di cappe, parafanghi, spoiler e per produrre oggetti di uso quotidiano, delle più svariate forme e dimensioni.

Gli oggetti ottenuti tramite stampaggio hanno il vantaggio di essere privi di tensioni interne, mostrando una migliore resistenza al calore e alla torsione.

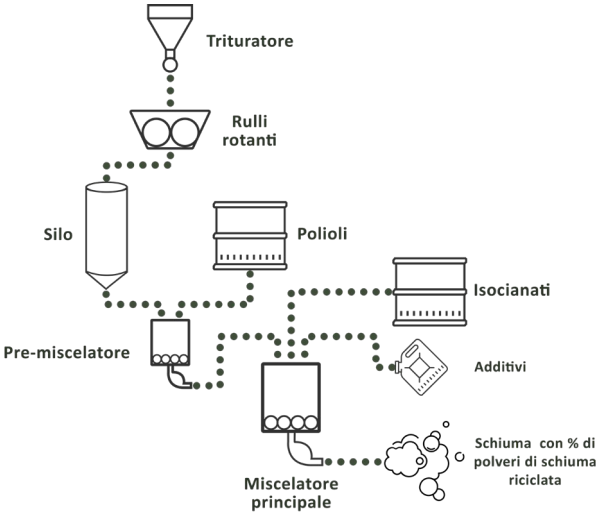


Fig. 18 Schema di riciclo meccanico della schiuma flessibile di poliuretano secondo la tecnica del regrind/powdering. Fonte dati: ISOPA, F*act Sheet - Recycling and Recovering Polyurethanes. Regrind/Powdering* (Giugno 2001), p. 1.

La macinazione o polverizzazione delle schiume poliuretaniche *(regrind/powdering)* prevede la riduzione del materiale post-consumo in particelle della dimensione di 0,05 – 0,2 mm di diametro,[30] le quali sono successivamente miscelate con i precursori del poliuretano per ottenere nuove schiume. La prima operazione consiste nell'inserimento degli scarti di schiuma in un primo trituratore che ne riduce le dimensioni, facendoli poi passare attraverso due rulli rotanti in direzioni opposte che li riducono in polvere. Le polveri sono quindi stoccate in un silo collegato ad un pre-miscelatore. In questa fase, le polveri di schiuma sono miscelate nelle giuste proporzioni con polioli, per formare un composto che viene pompato in un miscelatore principale. Nel miscelatore principale sono aggiunti gli isocianati e gli additivi necessari per la produzione del poliuretano. Alla fine del processo si otterrà una schiuma poliuretanica contenente una percentuale di polveri di schiuma riciclata, la cui quantità varia secondo l'applicazione e le prestazioni richieste (Fig. 18).

Questa tecnologia è stata sperimentata nella produzione di sedili di automobili realizzati con schiume contenenti il 15% - 20% di polveri di riciclo, ottenendo ottimi risultati prestazionali. La tabella seguente confronta le caratteristiche di un sedile composto da 100% schiuma vergine con uno contenente il 15% di polveri PUR riciclate (Tabella 1).

30 ISOPA, *Fact Sheet - Recycling and Recovering Polyurethanes. Regrind/Powdering* (Giugno 2001), p. 2.

Esempio: Schiuma MDI a polimerizzazione a freddo	100% PUR vergine	15% polveri PUR riciclate
Massa	1320 g	1320 g
Contenuto di polveri PUR riciclate	0 %	15 %
Durezza	360 N	360 N
Resistenza alla trazione	152 kPa	144 kPa
Allungamento	132 %	103 %

Tabella 1 Proprietà di un sedile 100% PUR vergine e di un sedile con 15% di polveri PUR riciclate. Fonte dati: ISOPA, *Fact Sheet - Recycling and Recovering Polyurethanes. Regrind/Powdering* (Giugno 2001), p. 2.

Il riciclo chimico è il processo di depolimerizzazione delle materie plastiche che permette di scindere i polimeri nei suoi monomeri originari o in molecole a catena più corta. La depolimerizzazione, reazione inversa della polimerizzazione, è impiegata soprattutto per il riciclo dei poliuretani, dei poliesteri (PET) e dei poliammidi (nylon), ed è applicata tramite la chemiolisi. I monomeri ottenuti da questo trattamento possono essere quindi utilizzati per produrre nuovi polimeri, le cui applicazioni potranno essere simili a quelle impiegate dagli elementi originali. La chemiolisi garantisce, infatti, il mantenimento delle proprietà del materiale di partenza, solo qualora siano disponibili input di materiale omogeneo.

Tra le tecniche di chemiolisi possiamo elencare:

- Glicolisi: combina gli scarti di poliuretano con glicoli e catalizzatori che, lavorati a pressioni e temperature elevate (circa 200 °C),[31] portano alla formazione di nuovi polioli con proprietà simili ai polioli vergini. I polioli ottenuti, quindi, possono essere introdotti nel processo di produzione di nuovi poliuretani diminuendo la richiesta di materie prime vergini. Attualmente è la tecnica di riciclo chimico più utilizzata.

- Idrolisi: utilizza l'acqua come solvente che, ad elevate temperature e pressioni, scinde le molecole della schiuma poliuretanica dando luogo a polioli polieteri e altri prodotti intermedi come le diammine (composti originari dei diisocianati). Questi composti possono essere riutilizzati per produrre nuovi poliuretani.

31 ISOPA, *Fact Sheet - Recycling and Recovering Polyurethanes. Chemolysis* (Giugno 2001), p. 2.

- Amminolisi: è un processo ancora in fase di ricerca, in cui la schiuma di poliuretano è fatta reagire con ammine sotto pressione a temperature elevate.

A differenza del riciclo chimico, il riciclo termico (o di *feedstock)* offre l'opportunità di riutilizzare la grande quantità di poliuretani misti presenti nei flussi di rifiuti. Questa tecnica permette di recuperare le materie prime contenute nel materiale, quali prodotti petroliferi e gassosi.

Tra le tecniche di riciclo termico si ricordano:

- Pirolisi;
- Riducenti dell'altoforno;
- Gassificazione;
- Idrogenazione.

La pirolisi consente di ottenere dai prodotti polimerici a fine vita i materiali semplici che la compongono. In un processo di pirolisi, le materie plastiche che compongono un prodotto sono riscaldate in atmosfera inerte, attuando un processo simile allo *steam cracking,* che porta alla rottura dei legami polimerici, ottenendo i monomeri di partenza o altre sostanze più semplici. La pirolisi è dunque un processo da cui si ottengono intermedi per l'industria chimica, adatti alla generazione di altri prodotti polimerici, aventi caratteristiche differenti a seconda del materiale di partenza, del tempo di reazione, della velocità di riscaldamento e della temperatura utilizzati.

In passato, i derivati del petrolio e del carbone sono stati utilizzati come agenti riducenti nell'altoforno. Oggi fino al 30%[32] di questi materiali può essere sostituito da plastica mista, iniettata nel forno. Condotte a temperature superiori ai 2000 °C, queste materie sono scomposte in frazioni elementari, quali carbonio e idrogeno. Questi catturano l'ossigeno dal minerale di ferro, producendo anidride carbonica, vapore e ghisa. Questa soluzione alternativa, di rilievo per gran parte dei rifiuti che diventeranno disponibili nel prossimo futuro, sta gradualmente prendendo piede tra i vari operatori di altoforno.

32 ISOPA, *Fact Sheet - End-of-life Vehicles Recovery and Recycling - Polyurethane Car Components Options Analysis* (Ottobre 2003), p. 4.

Tra tutti i processi di riciclo delle materie prime, il processo di gassificazione è probabilmente destinato a dimostrarsi quello più interessante per i prodotti poliuretanici. La gassificazione dei prodotti derivati da combustibili fossili è un processo esotermico che produce calore, ceneri e un gas di sintesi (o *syngas),* costituito da monossido di carbonio e idrogeno. Il processo di gassificazione richiede un primo passaggio, che porta alla liquefazione la materia da trattare. In seguito, la materia prima liquida è pompata in un reattore ad una temperatura di 1200-1500 °C e una pressione di 20 - 80 bar, addizionata con ossigeno. In pochi secondi si ha una conversione del 98% circa in gas e scorie.[33] In generale, i gas ottenuti possono essere reimpiegati nella produzione di nuovi precursori per prodotti poliuretanici vergini (isocianati e polieteri) o in alcuni processi di raffinazione.

Il processo di idrogenazione può essere visto come un intermedio tra pirolisi e gassificazione, in quanto, per mezzo di calore e idrogeno ad alta pressione, consente di ottenere prodotti gassosi e liquidi. Questi possono essere utilizzati come combustibili (anche come fonte energetica per il processo), nei processi di raffinazione e come intermedi per l'industria chimica.

L'incenerimento per il recupero di energia svolge un ruolo importante nel contesto della crescente gamma di opzioni di riciclo e riutilizzo dei materiali plastici. Con la maggior parte del petrolio, del carbone e del gas del mondo bruciati per produrre energia, vi è un forte motivo per una parziale sostituzione delle risorse energetiche con i rifiuti plastici. Il poliuretano si presta ad essere utilizzato in termovalorizzatori per produrre energia grazie al suo elevato potere calorifico residuo. L'innovazione nel campo della gestione delle emissioni sta rilanciando questa soluzione come la preferibile a tutte le altre, specie per quanto riguarda il riciclo di prodotti misti, la cui separazione è difficile e costosa. L'inserimento in inceneritori di rifiuti solidi urbani (RSU) e prodotti di origine polimerica è un trattamento oggi applicabile in modo sicuro, specie per quei prodotti che non potrebbero essere riciclati diversamente e sarebbero, dunque, accumulati nelle discariche. Infatti, l'incenerimento della schiuma di poliuretano riduce del 99%[34] in suo volume, con conseguente riduzione della necessità di discarica.

---

33 R. Zevenhoven, *Treatment and disposal of polyurethane wastes: options for recovery and recycling*, Helsinki University of Technology Department of Mechanical Engineering, Energy Engineering and Environmental Protection Publications (2004), p. 35.

34 K. M. Zia, H. N. Bhatti, I. A. Bhatti, *Methods for polyurethane and polyurethane composites, recycling and recovery: A review, Reactive and Functional Polymers*, vol. 67 issue 8, (2007), pp. 688-689.

3

PHASE CHANGE MATERIALS

PCMs

3.1 Introduzione ai PCMs

I materiali a cambiamento di fase (*Phase Change Materials* - PCMs) sono sostanze in grado di cambiare il proprio stato o fase, permettendo l'immagazzinamento e il rilascio di grandi quantità di calore nell'ambiente, mantenendo la propria temperatura costante durante il processo di transizione.

La gestione dell'energia termica è diventata importante a partire dalla crisi energetica degli anni '70 del Novecento, durante la quale l'uomo ha cercato fonti di energia alternative ai combustibili fossili. A causa della diminuzione di disponibilità di questi ultimi, e al loro conseguente rincaro, l'uso di fonti di energia rinnovabile, come quella solare, eolica e geotermica, ha permesso di diminuire l'inquinamento atmosferico, gli sprechi di energia e i costi dei consumi. La capacità dei PCM di assorbire calore dall'ambiente per poi rilasciarlo in un tempo successivo è sfruttata in molti campi, come per esempio nei sistemi fotovoltaici e nei pannelli solari, nei sistemi di refrigerazione e in edilizia. In particolare, per gli edifici, questa capacità può essere sfruttata per migliorare il controllo della temperatura all'interno delle strutture, in modo da evitare fenomeni di discomfort legati al surriscaldamento o al raffreddamento eccessivo degli ambienti, gestendo in modo migliore i picchi di carico.

L'accumulo di energia termica nei materiali può avvenire attraverso due modi:

- Accumulo per calore sensibile;
- Accumulo per calore latente.

L'accumulo per calore sensibile (*Sensible Heat Storage* – SHS) si verifica quando un corpo, solido o liquido, sottoposto ad una fonte di calore, aumenta la temperatura in funzione della sua capacità termica, accumulando o rilasciando calore nell'ambiente circostante.

La quantità di calore sensibile assorbita da un corpo dipende in modo proporzionale dalla sua massa, dal calore specifico e dalla differenza di temperatura alla quale è sottoposto il corpo, ed è espressa dalla seguente formula:[35]

35 R. Zuanetto, *Accumulo termico in edifici residenziali con materiali a cambiamento di fase,* Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale (2018), p. 16.

$$Q = m \cdot c_p \cdot (T_f - T_i) \qquad [J]$$

dove:

Q: quantità di calore sensibile immagazzinato/rilasciato [J];

m: massa del corpo [kg];

c_p: calore specifico del corpo [J/kg°C];

T_f, T_i: temperatura finale e iniziale del corpo [°C].

L'accumulo per calore latente (*Latent Heat Storage* - LHS), invece, si verifica quando un materiale assorbe o rilascia calore nell'ambiente circostante durante il suo cambiamento di fase, per esempio da solido a liquido, da liquido a gassoso, ecc. Tale quantità di calore è calcolabile attraverso la seguente formula:[36]

$$Q = m \cdot [c_{sp} \cdot (T_m - T_i) + a_m \cdot \Delta h_m + c_{lp} \cdot (T_f - T_m)] \qquad [J]$$

dove:

Q: quantità di calore latente immagazzinato/rilasciato [J];

m: massa del corpo [kg];

c_{sp}: calore specifico medio tra T_m e T_i [J/kg°C];

T_m: temperatura di fusione [°C];

T_i: temperatura iniziale [°C];

a_m: frazione fusa [-];

Δh_m: calore di fusione [J/kg];

c_{lp}: calore specifico medio tra T_m e T_f [J/kg°C];

T_f: temperatura finale [°C].

36 R. Zuanetto, *Accumulo termico in edifici residenziali con materiali a cambiamento di fase,* Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale (2018), p. 20.

I PCM, inizialmente, si comportano come materiali di stoccaggio tradizionale, nei quali la temperatura aumenta in funzione della temperatura esterna, ma una volta raggiunta la temperatura di cambiamento di fase, hanno la particolare proprietà di assorbire o rilasciare calore ad una temperatura costante (Fig. 19). La quantità di calore assorbita da un materiale a cambiamento di fase (LHS), a parità di unità di volume, è superiore dalle cinque alle quattordici volte[37] rispetto al calore accumulato dai materiali tradizionali (SHS).

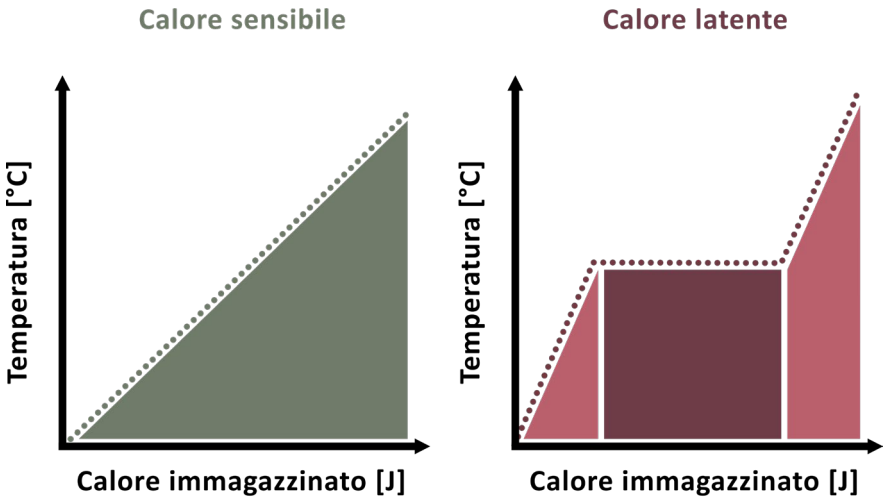


Fig. 19 Diagrammi di accumulo di calore sensibile e latente.

37 A. Sharmaa, V. V. Tyagi, C. R. Chen, D. Buddhi, *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 13 parte 2 (2009) p. 318-345.

3.2 Principali proprietà e tipologie

Facendo presente che esistono numerose tipologie di PCM con caratteristiche molto diverse tra loro, al fine di ottenere un sistema di accumulo termico efficiente, deve essere selezionato il PCM con le proprietà più idonee al campo di applicazione. Una delle più importanti caratteristiche da prendere in considerazione è la temperatura di transizione di fase che, se corrisponde alla temperatura di operatività del sistema nel quale viene utilizzato, permette al PCM di completare i cicli di scarico e ricarico di energia, trasmettendo tutto il calore immagazzinato all'ambiente circostante.

Le principali proprietà dei PCM, suddivise per categorie, sono:

Proprietà termiche:

- temperatura costante durante la transizione di fase: la temperatura del PCM, una volta raggiunta la temperatura di cambiamento di fase, rimane costante durante tutto il processo di transizione;
- elevato calore latente di fusione: corrisponde alla capacità di immagazzinamento del calore e, maggiore è tale valore, maggiore sarà l'energia termica accumulata;
- bassa conducibilità termica: i PCM hanno generalmente una bassa capacità di condurre calore, che comporta elevati intervalli di tempo tra i cicli di carico e scarico termico. La conducibilità termica può essere aumentata aggiungendo particelle di materiali conduttori, alette metalliche o polveri, come la grafite.

Proprietà fisiche:

- equilibrio durante il cambiamento di fase;
- elevata densità: permette di avere dimensioni più piccole quindi ingombro minore;
- minima variazione di volume durante il cambiamento di fase;
- bassa tensione di vapore: permette di evitare problemi dovuti al contenimento del PCM, come d'altronde una minima variazione di volume.

Proprietà chimiche:

- stabilità chimica sul lungo periodo: il PCM deve garantire la stabilità nel tempo, quindi non alterare la sua composizione chimica se messo a contatto con altri materiali o con l'aria, mantenendo le sue qualità anche dopo moltissimi cicli carico-scarico;
- non tossicità;
- non infiammabilità: questa proprietà riguarda, per esempio, la categoria dei PCM inorganici, mentre le paraffine e le non paraffine, facenti parte dei PCM organici, sono materiali infiammabili;
- non esplosività.

Proprietà cinetiche:

- nessun sottoraffreddamento: è un fenomeno negativo e abbastanza comune tra i PCM, legato alla temperatura di congelamento. Durante la fase di rilascio di calore, avviene un ritardo del processo di solidificazione portando un abbassamento della temperatura di congelamento di qualche grado, con la conseguente perdita di efficienza del materiale. Questo fenomeno è dovuto alla bassa velocità di cristallizzazione e si verifica principalmente nei materiali ad elevata viscosità nello stato liquido.

Proprietà economiche:

- disponibilità abbondante;
- costo non elevato.

I PCM possono essere classificati secondo diversi criteri. La classificazione più comune è data in funzione dello stato delle sostanze prima e dopo il cambiamento di fase, e permette di distinguere i quattro seguenti macro-gruppi (Fig. 20):

- PCM solidi-liquidi;
- PCM solidi-solidi;
- PCM gas-liquidi;

- PCM gas-solidi.

Attualmente, la categoria più utilizzata è quella dei PCM solidi-liquidi, grazie alla loro elevata capacità di accumulo di calore latente e bassa variazione di volume durante il processo di cambiamento di fase. Il PCM, soggetto ad una fonte di calore, aumenta la sua temperatura fino a raggiungere la fusione, ed è in questo momento che avviene il passaggio di fase da solido a liquido. In questo lasso di tempo il PCM mantiene la sua temperatura costante ed accumula il calore assorbito dall'ambiente. Quando la temperatura esterna diminuisce, il PCM cede il calore precedentemente assorbito e torna allo stato solido, sempre mantenendo la sua temperatura costante.

I PCM solidi-liquidi sono divisi in base alla loro natura chimica in tre gruppi:

- PCM organici;
- PCM inorganici;
- PCM eutettici.

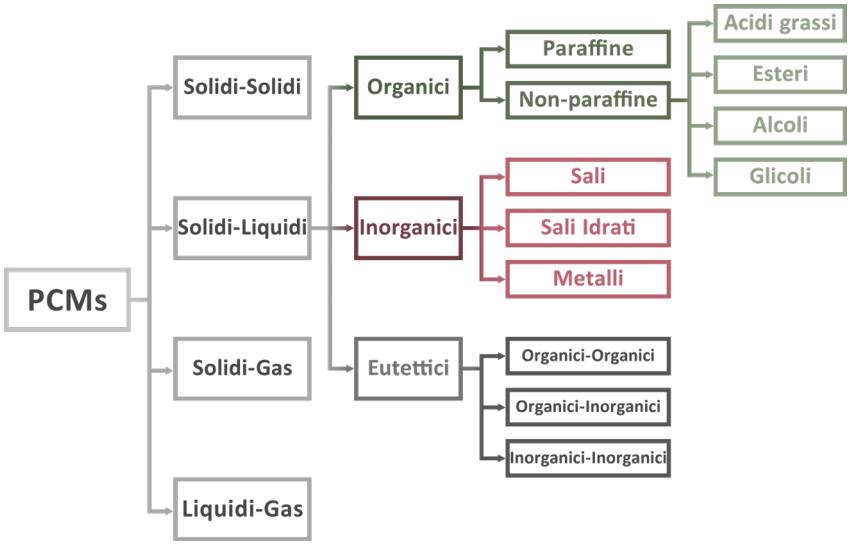


Fig. 20 Classificazione dei PCM.

I PCM organici comprendono i composti paraffinici e quelli non paraffinici. Queste sostanze sono in grado di fondere e solidificare ripetutamente senza che il loro calore latente di fusione diminuisca nel tempo. Generalmente, hanno valori di conducibilità termica inferiori rispetto ai PCM inorganici, non sono corrosivi ma sono spesso infiammabili.

Le paraffine (descritte in modo più approfondito nel paragrafo successivo) sono disponibili con differenti temperature di fusione, pur avendo proprietà molto simili: hanno un alto valore di calore latente di fusione (130 - 210 kJ/kg),[38] sono chimicamente inerti e stabili sotto i 500 °C e il loro costo è relativamente basso. Tuttavia, le paraffine hanno un basso valore di conducibilità termica (dell'ordine di 0,2 W/mK)[39] e alcuni tipi sono chimicamente incompatibili con i contenitori plastici, possiedono una lieve variazione di volume nella transizione di fase, e sono moderatamente infiammabili.

Nella categoria dei composti non paraffinici, invece, rientrano diversi materiali con proprietà differenti tra loro: gli acidi grassi, gli esteri, gli alcoli e i glicoli. Questi materiali hanno alti valori di calore latente di fusione, ma sono infiammabili, per cui non devono essere sottoposti a temperature troppo elevate. Gli acidi grassi possono essere impiegati in alcuni sistemi di accumulo termico ed il loro principale svantaggio rispetto alla paraffina è il costo, che è circa il doppio. Tra i composti non paraffinici possiamo citare alcuni materiali noti come la glicerina, l'acido acetico, l'acido formico, l'acido stearico e la cera d'api.

I composti inorganici sono più economici, non sono infiammabili e hanno una capacità di accumulo termico per unità di volume quasi doppia rispetto a quella dei composti organici. Lo svantaggio, è che tale capacità tende a diminuire nel tempo, facendo peggiorare le prestazioni del PCM a seguito di numerosi cicli di scarico e ricarico. Proprio a causa di questa diminuzione prestazionale, gli inorganici trovano più difficile applicazione degli organici, fatta eccezione per i sali idrati. I PCM inorganici possono essere suddivisi in sali, sali idrati e metalli.

I sali idrati sono composti costituiti da sali inorganici e acqua che insieme formano una struttura cristallina. Il loro processo di cambiamento di fase da solido a liquido e viceversa, corrisponde ad un processo di disidratazione

38 F. Grigolato, *Problemi e potenzialità degli accumuli termici a cambiamento di fase – Progetto di un impianto di prova,* Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali (2016), p.14.

39 *Op. cit*.

e idratazione del sale, con il problema che questi passaggi avvengono con una segregazione di fase, ovvero non si completano totalmente, perdendo progressivamente capacità di accumulare calore. I sali idrati sono poco costosi, possiedono una conducibilità termica di circa 0,5 W/mK[40] e una bassa variazione di volume, sono compatibili con i materiali plastici e hanno una bassa tossicità.

I metalli che rientrano in questa categoria sono quelli a bassa temperatura di fusione e i metalli eutettici. A causa del loro elevato peso, l'applicazione di questi materiali risulta molto difficile. La caratteristica che più li distingue dagli altri PCM è l'elevata conducibilità termica.

I materiali eutettici a cambiamento di fase sono composti di materiali organici e/o inorganici che quasi sempre si sciolgono e si solidificano senza che avvenga una segregazione di fase. In funzione della natura dei materiali, essi sono classificati in PCM eutettici organici-organici, organici-inorganici e inorganici-inorganici. Le proprietà chimico-fisiche variano a seconda dei materiali che li compongono, ma generalmente i materiali eutettici hanno una temperatura di fusione più bassa rispetto alle singole sostanze di cui sono costituiti.

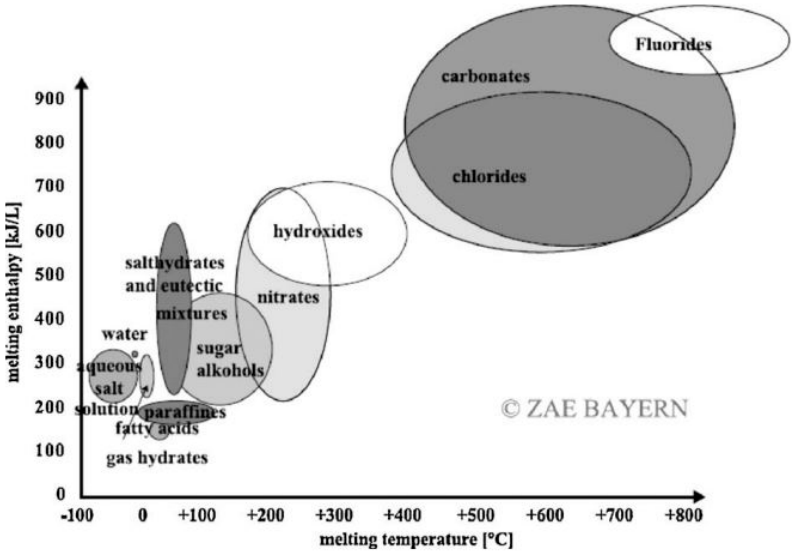


Fig. 21 Diagramma del rapporto tra la temperatura di fusione e l'entalpia di fusione dei PCM. Fonte immagine: L. F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia, A. I. Fernández, *Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15 parte 3 (2011) p. 1677.

40 *Op.cit.*, p.15.

3.3 Tecniche di contenimento

Nella maggior parte dei casi, i PCM devono essere incapsulati per evitare la dispersione del materiale durante la fase liquida. Le particelle di PCM devono, quindi, essere racchiuse all'interno di materiali chimicamente compatibili, che non si degradino nel tempo.

Il contenimento dei PCM deve soddisfare determinati requisiti:

- Resistenza meccanica, flessibilità, resistenza alla corrosione e stabilità termica;
- Proteggere i PCM dall'interazione con l'ambiente;
- Fornire una superficie sufficiente per il trasferimento del calore;
- Facilitare la manovrabilità.

Questi fattori sono determinanti in quanto possono influenzare l'efficienza e la durata dello scambio termico. Esistono tre tecniche di contenimento dei PCM:

- Macro-incapsulamento;
- Micro-incapsulamento;
- Assorbimento.

Il macro-incapsulamento è la tecnica più diffusa di contenimento e consiste nell'inserire il PCM sfuso in un contenitore che generalmente è in materiale polimerico o metallico, in particolare alluminio e acciaio. I contenitori possono avere forme e dimensioni diverse (tubi, pannelli o sacchi), in funzione dell'applicazione e hanno dimensione maggiore di 1 cm. Possono servire direttamente come scambiatori di calore o possono essere incorporati in altri elementi. La massa dei PCM incapsulati può variare da pochi grammi ad un chilogrammo. Questa tecnica comporta numerosi vantaggi, tra cui la riduzione delle variazioni di volume durante il cambiamento di fase, la protezione del PCM dal contatto con l'ambiente esterno e altri materiali che ne potrebbero alterare la struttura. La conducibilità termica può essere sensibilmente aumentata con l'uso di contenitori metallici,

aumentando la velocità di scambio del calore.

Il micro-incapsulamento è una più recente forma di incapsulamento che permette di racchiudere in un sottile film polimerico particelle di PCM ad alto peso molecolare e dimensione inferiore a 1 mm. I polimeri di incapsulamento prendono la forma di piccole sfere o bastoncelli, garantendo una matrice sigillata compatibile con il PCM. Le sfere possono essere a loro volta racchiuse in contenitori più grandi, che ne facilitano la manovrabilità. Ulteriori vantaggi rispetto al macro-incapsulamento sono la riduzione della segregazione del PCM durante il cambiamento di fase e il miglioramento del trasferimento di calore per conduzione, grazie all'ampio rapporto tra superficie e volume occupato. Attualmente, il costo di questo sistema è piuttosto elevato rispetto ad altri metodi di contenimento, limitando le sue applicazioni. Fino ad oggi, è utilizzato negli impianti di energia solare e nei materiali da costruzione tecnologicamente avanzati, ma anche in prodotti farmaceutici, cosmetici e altre applicazioni mediche.

Un'altra tecnica che si può utilizzare per combinare i PCM con altri materiali è l'assorbimento. Questo metodo richiede l'uso di materiali caratterizzati da una struttura porosa e/o fibrosa, che fungono da contenimento per il PCM allo stato liquido, il quale viene trattenuto per tensione superficiale. Sono stati condotti esperimenti sull'integrazione di acidi grassi e paraffine in pannelli di gesso e blocchi di cemento, con diverse percentuali in peso. La matrice di gesso è un eccellente supporto per il PCM, poiché circa il 41% del volume del pannello è costituito da sacche d'aria. È stato riscontrato che, con circa il 20% in peso di acidi grassi, la capacità di stoccaggio e di scarico del calore rispetto al solo pannello di gesso è aumentata di dieci volte.[41] È necessario determinare, per ogni materiale, la giusta proporzione in peso di PCM assorbito.

41 A. M. Khudhair, M. M. Farid, *A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials*, Energy Conversion and Management, vol. 45 parte 2 (2004) pp. 263-275.

3.4 Paraffina

3.4.1 Composizione

I composti paraffinici sono materiali a cambiamento di fase appartenenti alla categoria degli organici. Sono prodotti derivati dalla raffinazione del petrolio, durante i processi di produzione dei carburanti. Allo stato solido hanno una struttura cristallina e una consistenza cerosa, un colore biancastro più o meno traslucido e sono inodore e insapore. Se sottoposti ad una fonte di calore fondono cambiando il proprio stato da solido a liquido.

Le paraffine sono composte da catene lineari di n-alcani CH_3-CH_2-CH_3 (idrocarburi saturi) di diversa lunghezza, al crescere della quale aumentano anche la temperatura di fusione e il calore latente di fusione. Durante il processo di congelamento, una grande quantità di calore latente viene rilasciata in seguito alla cristallizzazione della catena CH_3.

Le paraffine disponibili in commercio hanno un ampio *range* di temperature di fusione che vanno da circa -10 °C a 90 °C.[42] Questa ampia disponibilità permette di avere una vasta gamma di applicazioni in funzione della temperatura di operatività del sistema selezionato.

Un vantaggio che connota questi PCM è l'elevata capacità di accumulo termico che, come precedentemente detto, si aggira intorno a 130 - 210 kJ/kg. Esse, inoltre, durante il cambiamento in fase liquida, non sono soggette a segregazione e a sottoraffreddamento. La loro variazione di volume è minima, intorno al 10%.[43] Le paraffine non sono corrosive e sono chimicamente inerti e stabili al di sotto dei 500 °C, anche dopo molti cicli. Risultano più accessibili economicamente in confronto alle altre tipologie di PCM.

Il principale svantaggio che le caratterizza è la bassa conducibilità termica, di circa 0,2 W/mK, che impedisce la completa fusione o congelamento del PCM a causa del lento rilascio di calore. Essendo un derivato del petrolio, la paraffina è un materiale infiammabile, per cui è necessario prendere determinate precauzioni anche in

42 Rubitherm GmbH, https://www.rubitherm.eu/
43 R. Zuanetto, *Accumulo termico in edifici residenziali con materiali a cambiamento di fase,* Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale (2018), p. 31.

funzione dei campi di applicazione. La sua incompatibilità con i materiali plastici non permette l'incapsulamento in contenitori o microcapsule di plastica, ed è quindi necessario utilizzare altri tipi di contenimento.

Un'altra caratteristica a cui porre attenzione per individuarne l'applicazione è la sua appartenenza alla categoria di materiali che rappresentano un rischio chimico per l'uomo. Il Regolamento CLP (CE 1272/2008), che identifica la classificazione, etichettatura e imballaggio delle sostanze chimiche, funge da adeguamento al GHS (*Globally Harmonised System),* il sistema di codificazione a livello mondiale di prodotti chimici e miscele pericolosi. Il CLP suddivide i prodotti, le miscele e le sostanze chimiche in quattro categorie: pericoli fisici, pericoli per la salute, pericoli per l'ambiente e ulteriori pericoli. Le categorie sono inoltre suddivise in relative classi di pericolo riportate nell'Allegato V, riprese dalle classi individuate nel GHS. I prodotti così suddivisi vengono etichettati con i corrispondenti pittogrammi di pericolo o di avvertenza.

La paraffina è identificata nell'Allegato V del regolamento CLP nella tipologia di sostanze pericolose per la salute, dal codice *GSH 08*, Sezione 3.4 "Sensibilizzazione delle vie respiratorie, categoria di pericolo 1".[44] La tossicità in caso di aspirazione della Categoria 1 è indicata dal regolamento CLP dal codice *H304: "Può essere letale in caso di ingestione e di penetrazione nelle vie respiratorie".*[45] A fianco è riportato il pittogramma di pericolo corrispondente, riportato sulle schede prodotto e sui contenitori dei prodotti chimici.

3.4.2 Processo produttivo

La paraffina è un prodotto ottenuto dal processo di raffinazione del petrolio greggio (Fig. 22). Una delle frazioni ottenute dalle fasi di vaporizzazione e frazionamento è l'olio lubrificante grezzo, nel quale è contenuta la cera di paraffina grezza. Per poter lavorare la cera grezza in prodotti a base di paraffina, è necessario separare la componente di cera dagli oli lubrificanti grezzi, attraverso un lungo e costoso processo di raffinazione. Il colore e l'aspetto della cera sono un fattore importante, in quanto rivelano la possibile presenza di tracce di olio residue, che fa assumere alla cera un colore giallastro. Il contenuto di olio consentito nella paraffina è di circa l'1%, mentre

44 Regolamento CPL (CE 1272/2008), *relativo alla classificazione, all'etichettatura e all'imballaggio delle sostanze e delle miscele che modifica e abroga le direttive 67/548/CEE e 1999/45/CE e che reca modifica al regolamento (CE) n. 1907/2006,* p. 327.

45 *Op.cit*., p. 128.

per applicazioni nell'ambito alimentare non può superare lo 0,5%.[46]

Sebbene la cera sia un sottoprodotto dovuto alla lavorazione degli oli lubrificanti, la paraffina ha impieghi commerciali in molti settori:

- Industriale: gomma per pneumatici e guarnizioni;
- Farmaceutico e cosmetico: creme, saponi, oli, vaselina;
- Alimentare: confezionamento e conservazione di salumi e formaggi;
- Prodotti per la casa: candele, detersivi, cere per pavimenti e per mobili;
- Tessile: prodotti impermeabilizzanti per l'abbigliamento.

Le tipologie e le quantità di cere ottenibili dal processo di raffinazione dipendono dalle caratteristiche del petrolio stesso. Il petrolio estratto viene stoccato in grandi cisterne per un certo periodo, prima di essere condotto alla torre di frazionamento. Nelle cisterne, in funzione del tempo di stoccaggio e della quantità di cera presente negli oli, la cera inizia a separarsi dal greggio, andando a depositarsi sul fondo, essendo la frazione più pesante. Un altro fattore che facilita la separazione è la temperatura, in quanto la componente cerosa cristallizza in presenza di basse temperature, separandosi dal petrolio. In queste fasi è possibile rimuovere una prima porzione di cere grezze, che vengono successivamente raffinate. Ciò è importante sia per la produzione di prodotti paraffinici, sia per le fasi di raffinazione del petrolio, poiché i depositi di cera dovuti alla decantazione del greggio potrebbero danneggiare le tubazioni che lo trasportano dai pozzi di stoccaggio alle raffinerie.

Successivamente il petrolio viene convogliato nella torre di frazionamento, nella quale, dopo essere stato portato a temperature elevate 350 - 400 °C, si suddivide in frazioni di prodotti, diverse per peso: dalla parte alta della torre fuoriescono le frazioni più leggere, come il gas GPL, al di sotto si ottengono per condensazione benzina, kerosene e gasolio, mentre nella parte bassa, alle temperature più elevate, rimangono le frazioni più pesanti, quali gli oli combustibili, gli oli lubrificanti e i bitumi. Gli oli lubrificanti, contenenti le cere, sono dunque prodotti dalla frazione più pesante del petrolio greggio.

46 R. H. Espach, *Manufacture Of Paraffin Wax From Petroleum*, United States Government Printing Office, Washington (1935), p. 6.

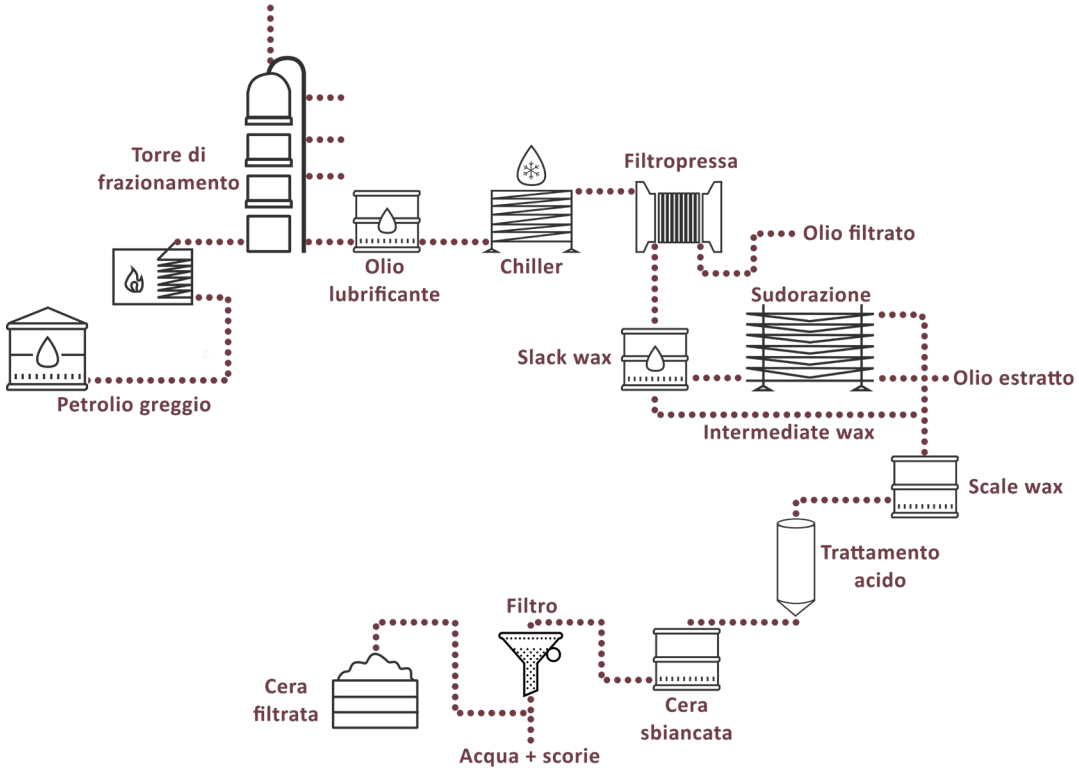


Fig. 22 Processo produttivo della cera di paraffina

L'olio raffinato, con circa il 10% di cera, viene prelevato e pompato in una serie di scambiatori di calore e macchine di raffreddamento. All'interno di questi macchinari temperatura dell'olio diminuisce e la cera comincia a cristallizzare, separandosi. Tale miscela di olio e cristalli di cere, viene fatta passare attraverso una filtropressa, che trattiene i cristalli, facendo passare la maggior parte dell'olio. La cera trattenuta nella filtropressa viene definita "cera molle" (*slack wax*) e contiene ancora circa il 50% di olio.[47] Queste operazioni di raffreddamento e filtraggio vengono ripetute in più cicli, al fine di ridurre progressivamente la quantità di olio contenuta nelle cere.

La deoliazione della cera molle può essere effettuata attraverso due processi: la sudorazione o la decerazione

47 R. H. Espach, *Manufacture of paraffin wax from petroleum*, United States Government Printing Office, Washington (1935), p. 95.

degli oli tramite solventi.

La sudorazione (Fig. 23) è attualmente uno dei metodi meno utilizzati, che permette di separare le cere a diversi punti di fusione, rimuovendo in modo progressivo il contenuto di olio. La cera molle viene raffreddata fino allo stato semi-solido e gradualmente riscaldata, attraverso uno scambiatore di calore. Nel forno per la sudorazione cominciano a fondere le cere a più basso punto di fusione insieme alla maggior parte dell'olio, gocciolando su dei piatti orizzontali posti sul fondo del forno. Questo processo permette, oltre a rimuovere la frazione oleosa, di separare le cere a più alto punto di fusione e minor contenuto di olio, che rimangono all'interno del forno. Al crescere della temperatura, i piatti continuano a riempirsi di cera più pura e a più alto punto di fusione, fino alla completa espulsione della miscela dal forno. Quando ogni piatto viene espulso, la cera contenuta viene testata per il suo punto di congelamento e contenuto di olio e, in base a questi parametri, può essere reimmessa nel processo di sudorazione (*intermediate wax*) o proseguire verso ulteriori step (*scale wax*).

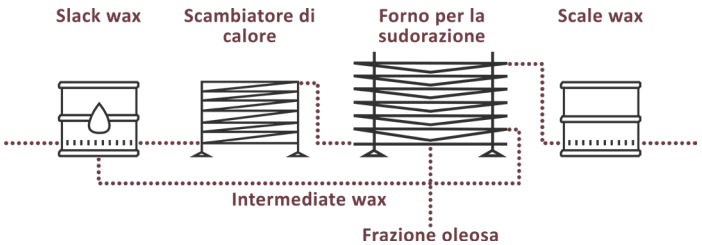


Fig. 23 Schema del processo di sudorazione.

Il processo di decerazione degli oli tramite solventi (Fig. 24) inizia dalla miscela di cera molle prelevata dalla filtropressa. Essa è riscaldata, in funzione del punto di fusione, ad una temperatura che varia dai 38 °C ai 99 °C circa, in uno scambiatore di calore. La sostanza fluida fuoriuscita è miscelata insieme ad un solvente freddo, che ne abbassa la temperatura tra gli 27 °C e i 65,5 °C,[48] prima di essere immessa in una macchina refrigerante. Qui la temperatura del composto è abbattuta in pochi secondi, generando una miscela di cristalli di cera e olio-solvente. I solventi utilizzati sono composti da una miscela di un chetone alifatico, come l'acetone, e un idrocarburo aromatico, come il benzene o il toluene. Questi permettono la separazione della frazione oleosa

48 R. Bodemuller, *Solvent dewaxing process*, Texaco Inc, cod. US3764517A, New York (1970).

dalle cere, poiché interagiscono solo con gli oli, mentre le cere rimangono insolute. La miscela refrigerata è pompata attraverso una filtropressa, che trattiene i cristalli di cera ed espelle la miscela di oli e solventi. Il filtro incerato viene lavato con altri solventi, per distaccare la componente cerosa, mentre la miscela olio-solvente viene distillata per ottenere olio decerato e per recuperare il solvente, che viene reimmesso nel sistema. La soluzione di cera e solvente passa attraverso ulteriori filtri, che isolano la cera e recuperano i solventi.

La cera raffinata, ottenuta dai precedenti processi, subisce un trattamento a base di acido solforico, che rimuove sostanze coloranti e indesiderate. L'acido è poi neutralizzato per mezzo di soda caustica, che viene lavata dalla cera attraverso getti di acqua calda. La filtrazione finale, attraverso la polvere di terra di Fuller (argilla naturale con proprietà sbiancanti), permette di eliminare particelle di materia estranea e acqua, migliorandone il colore, tipicamente biancastro.

La cera così ottenuta ha un contenuto di olio al di sotto dello 0,5% ed è pronta per essere messa sul mercato nelle varie applicazioni conosciute.

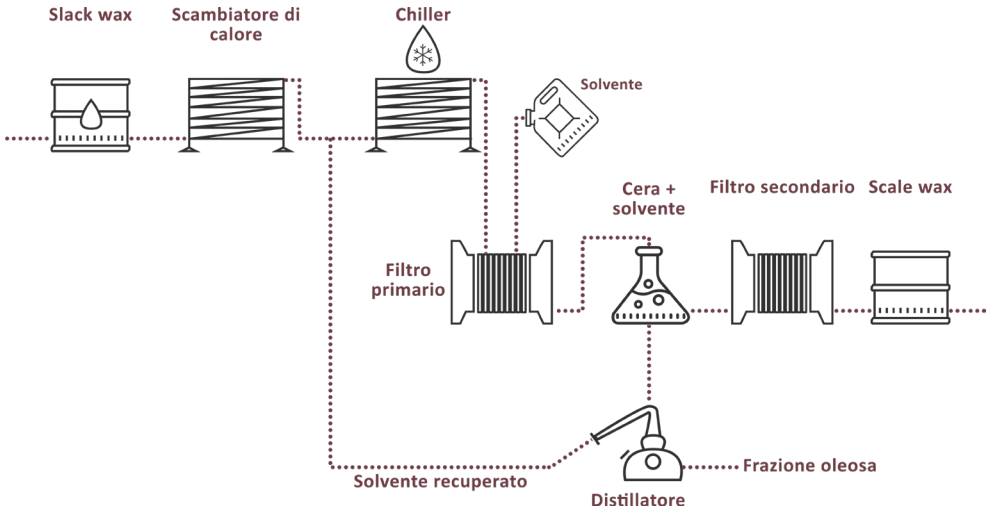


Fig. 23 Schema del processo di sudorazione.

PARTE II

NBT PER L'AUTOMOTIVE

4.1 Concept

La ricerca sviluppata in questa tesi sperimentale è nata da una collaborazione tra il Dipartimento Energia (DENERG) e Dipartimento di Architettura e Design (DAD) del Politecnico di Torino e la startup *ReMat*. L'obiettivo della startup è il riciclo di materiali derivanti dai grandi imbottiti e dagli sfridi di lavorazione dei prodotti in schiuma di poliuretano, per fabbricare nuovi materiali applicando i principi dell'economia circolare. Questa collaborazione ha lo scopo di indagare i prototipi realizzati dalle aziende di riciclo, quali la *Secondly* in Francia e la *Cormatex* a Prato, definendone le potenzialità e le possibili applicazioni sul mercato.

Tra i possibili campi applicativi, già elencati nell'introduzione di questa tesi, si è scelto di indagare il campo del comfort termico in *automotive*, sperimentando un prototipo composto da pannelli di schiuma di poliuretano riciclata, prodotti da *Secondly*, ai quali viene addizionata una percentuale di un materiale a cambiamento di fase di origine organica, quale la paraffina (Fig. 25).

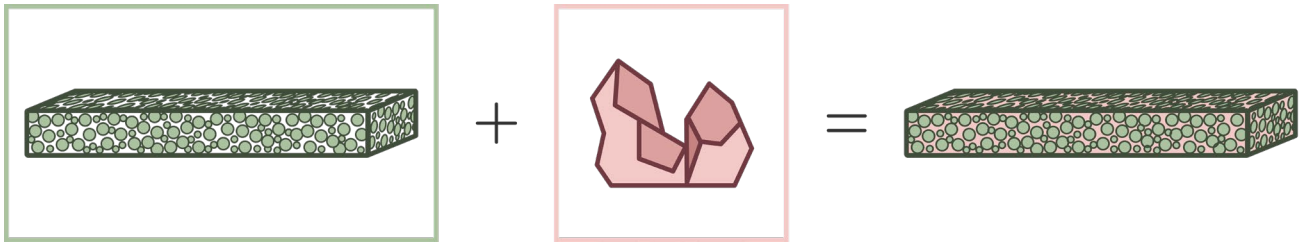


Fig. 25 Schema iconico della composizione del prototipo NBT.

L'inserimento di questo prototipo è stato ipotizzato all'interno di sedili, tetto, cruscotto e portiere delle auto, andando a sostituire o ad affiancare il *layer* di isolante termo-acustico attualmente presente, costituito da schiume poliuretaniche vergini e feltri (Fig. 26).

Il nome scelto per il prototipo, *Not Bed Technology* o NBT, è un gioco di parole che mira a raccontare la storia del composto: al suo interno sono infatti racchiusi materiali derivati dal riciclo dei materassi a fine vita, che possono ora essere utili per un nuovo scopo, differente da quello di partenza. Implementando la matrice poliuretanica con un materiale a cambiamento di fase, si punta ad ottenere un composto che riduca i consumi di energia,

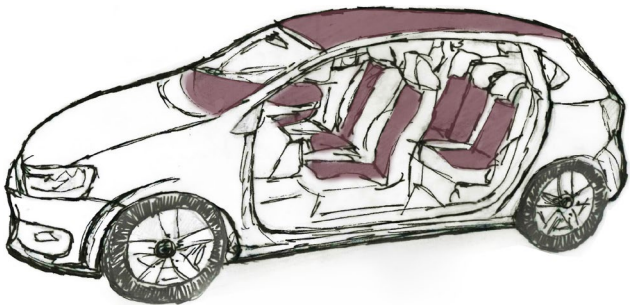


Fig. 26 Schema che indica il posizionamento del prototipo NBT all'interno dell'abitacolo.

abbassando le temperature all'interno dell'abitacolo, e di risorse, riciclando materiali caratterizzati da elevati impatti ambientali nella fase di produzione.

L'obiettivo generale che si vuole raggiungere con questo prototipo è il miglioramento dei livelli di comfort termico all'interno degli autoveicoli nel periodo estivo, andando a mitigare l'impatto dell'irraggiamento solare nelle ore di picco e a mantenere una temperatura interna costante, grazie alle proprietà di accumulo termico del materiale a cambiamento di fase.

A questo potenziale beneficio, si affianca una prospettiva futura. In vista dello sviluppo verso una mobilità sostenibile, che prevede la diminuzione delle emissioni in atmosfera per mezzo della sostituzione dei veicoli alimentati a combustibili fossili con le auto elettriche, il tema dell'autonomia dei veicoli è cruciale. Si riscontra, infatti, che la limitata autonomia delle batterie delle auto elettriche è uno dei maggiori svantaggi, che le vede ancora sfavorite rispetto ai veicoli tradizionali. L'impiego di questo nuovo materiale composito nell'abitacolo potrà ridurre la temperatura interna e, di conseguenza, la potenza impiegata per il condizionamento dell'ambiente durante la stagione estiva, con un aumento di autonomia del veicolo elettrico e della sua competitività sul mercato.

La possibile applicazione dei PCMs nel campo dell'automotive non è una scoperta recente. Infatti, esistono numerose ricerche che indagano le possibilità di integrare questi materiali all'interno delle automobili, per svolgere numerosi compiti. Tra le più comuni si evincono la ricerca per la gestione della temperatura delle batterie nei veicoli elettrici (*BEV*) e quella per la climatizzazione della cabina in autovetture che adottano la tecnologia *stop & start.*

La prima è indirizzata verso la risoluzione dei problemi di autonomia delle auto elettriche alimentate a batteria. Uno degli inconvenienti che aumenta il deterioramento precoce delle batterie agli ioni di litio è il loro

surriscaldamento. Il PCM può assorbire il calore in eccesso e ridurre i picchi, proteggendo le batterie dal calore diretto e indiretto. Il secondo campo di ricerca sfrutta la capacità del PCM di immagazzinare calore nel momento in cui la macchina, durante una breve sosta, si ferma. La sospensione dell'auto, infatti, comporta anche l'arresto del compressore dell'aria condizionata. Per mantenere un livello di comfort all'interno della cabina, si utilizza un PCM a punto di fusione più basso della temperatura ambiente, che fonde non appena il motore viene spento e l'aria calda del motore viene pompata all'interno dell'abitacolo.

Come affermato in precedenza, anche questa ricerca mira a ridurre il carico termico all'interno dell'abitacolo, per migliorare il comfort dei passeggeri. Come si evince da altre ricerche effettuate sullo stesso campo,[49] l'inserimento della tecnologia dei materiali a cambiamento di fase all'interno dell'autovettura comporta un risparmio sui consumi di elettricità e carburante impiegati nell'impianto di raffrescamento e riscaldamento. Il controllo termico attraverso i PCM avviene in modo passivo, senza che venga indotto e mantenuto elettricamente. In questo modo, il comfort è mantenuto in modo continuativo, evitando i picchi di riscaldamento e raffrescamento che il passeggero subisce durante un tragitto.

In alcune indagini sul comfort termico nell'abitacolo, si evidenzia che l'ambiente interno di un'autovettura non può essere assimilato a quello di un edificio, che mantiene pressoché stazionaria la sua temperatura. Un veicolo in movimento, invece, subisce repentini cambi di temperatura in condizioni transitorie, richiedendo continui apporti di energia per mantenere la condizione termica ottimale per il guidatore e gli altri passeggeri. Per valutare un sistema che mitighi gli stress termici in una vettura, è stato necessario concentrare l'analisi sulle condizioni estive. L'elevata temperatura dell'aria esterna e la radiazione solare incidente nelle ore di picco solare possono essere la causa di un grave disagio termico, che distoglie l'attenzione del guidatore dalla strada.

Le temperature più alte in periodo estivo si registrano quando la macchina è parcheggiata all'aperto e quando è in movimento, raggiungendo valori interni superiori ai 60° C, molto al di sopra della soglia di comfort situata intorno ai 25 - 26° C. Ciò è dovuto alla presenza della radiazione solare diretta, che penetra nell'abitacolo attraverso le superfici trasparenti del parabrezza e dei finestrini, rimanendo in parte intrappolata nell'abitacolo e

49 B. H. Pause, *Thermal control of automotive interiors with phase change material*, cod. US20040154784A1, Longmont (2004), p. 2.

surriscaldando aria e superfici, che trasmettono a loro volta calore per conduzione, convezione e irraggiamento ai passeggeri.

Partendo da queste osservazioni, si delinea l'obiettivo del prototipo, che mira ad ottenere un duplice vantaggio: la riduzione dei consumi dovuti all'accensione dell'impianto di raffrescamento durante le brevi soste e la riduzione del discomfort causato dalla percezione di temperature differenti sul corpo umano, che si verifica quando si aziona il getto d'aria del condizionatore.

Nei capitoli successivi verrà presentato il prototipo oggetto di studio: la sua composizione, la preparazione e le osservazioni sul suo comportamento. È stato proposto un materassino di poliuretano riciclato di 5 cm di spessore, con percentuali differenti di paraffina al suo interno, che verrà poi messo in sottovuoto per essere ridotto ad uno spessore di 3 cm ed essere indagato termicamente. Dei tre campioni ottenuti verranno poi analizzate le prestazioni termiche, attraverso l'impiego di uno strumento che misura il flusso di calore che attraversa il prototipo, per determinarne la conducibilità termica (λ) e l'entalpia in funzione della temperatura (h).

4.2 Prototipazione

4.2.1 Materiali

Il prototipo realizzato ed analizzato nel corso di questa tesi è composto da un pannello di schiuma morbida di poliuretano riciclato imbibito di paraffina in diverse percentuali.

Il pannello di schiuma morbida di poliuretano è realizzato dall'impianto di riciclo dell'azienda *Secondly Sud-Est*, nel comune di Flaviac (Dipartimento dell'Ardèche, Francia), identificato con il codice "SDY 30H10 PU". Esso si presenta come un pannello composto da pellet di schiuma morbida di poliuretano riciclati, accorpati a fibre naturali e di poliestere, in diverse percentuali. Tutti i materiali che lo compongono, dalla schiuma di poliuretano alle fibre tessili, derivano dal riciclo di materassi EOL (Fig. 27).

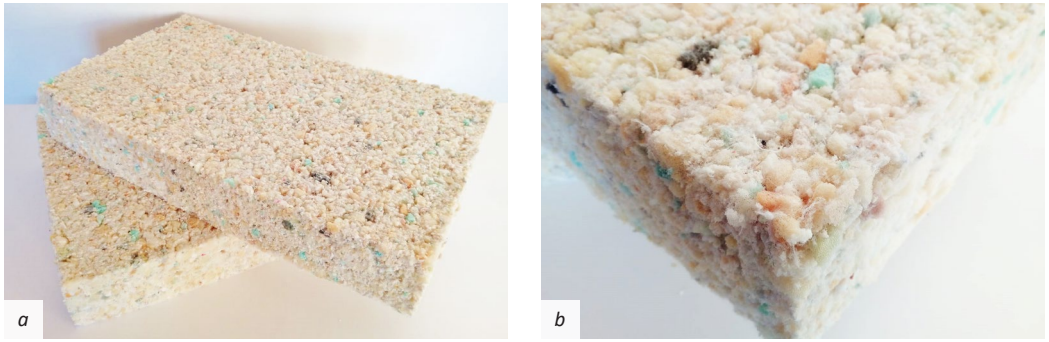


Fig. 27 Pannelli "SDY 30H10 PU", dimensioni 65x40x10 cm.

Le caratteristiche e le proprietà fisiche del pannello SDY 30H10 PU sono elencate di seguito (Tab. 2):

Composizione	**Valori**	**Unità di misura**	**Tolleranza**
Schiuma di PUR e lattice	50	[% in peso]	± 10 % in peso
Fibre naturali, sintetiche e di PUR	30	[% in peso]	± 10 % in peso
Fibre di poliestere	20	[% in peso]	± 5 % in peso
Proprietà			

Densità	30	[kg/m³]	± 2 kg/m³
Lunghezza	Max. 2100	[mm]	± 10 mm
Larghezza	Min. 720	[mm]	± 10 mm
Altezza	100	[mm]	± 5 mm
Colore	Crema		
Flash point	Non specificato		

Tabella 2 Caratteristiche tecniche del prodotto SDY 30H10 PU. Fonte dati: Secondly, scheda prodotto “SDY 30H10 PU”.

Per raggiungere l’obiettivo prefissato di ridurre il carico termico estivo all’interno dell’abitacolo di un veicolo, si propone di inserire all’interno del pannello di schiuma un materiale a cambiamento di fase (PCM). Il PCM individuato per questa applicazione è una paraffina, facente parte del gruppo dei PCM organici, con temperatura di fusione pari a 35 °C. La paraffina utilizzata, identificata con il codice “RT35”, è stata fornita dall’azienda tedesca *Rubitherm Technologies GmbH*.

Fig. 28 a) paraffina RT35 allo stato fuso prelevata dalla tanica; b) paraffina RT35 allo stato solido.

La tabella seguente riporta i dati relativi alla scheda tecnica della paraffina RT35 (Tab. 3):

Caratteristiche	**Valori**	**Unità di misura**	**Note**
Range di temperatura di fusione	29 – 36	[°C]	
Range di temperatura di congelamento	36 - 31	[°C]	

Capacità termica specifica (somma del calore latente e sensibile)	160	[kJ/kg]	± 7,5 %
Calore specifico	2	[kJ/kg·K]	
Densità allo stato solido	0,86	[kg/]	t = 15 °C
Densità allo stato liquido	0,77	[kg/l]	t = 45 °C
Conducibilità termica	0,2	[W/m·K]	Per entrambe le fasi
Variazione di volume	12,5	[%]	
Flash point	167	[°C]	
Temperatura max. di esercizio	65	[°C]	
GHS08 “Rischio mutageno, respiratorio, cancerogeno e per la riproduzione” H304 “Può essere letale in caso di ingestione e di penetrazione nelle vie respiratorie”			

Tabella 3 Caratteristiche tecniche della paraffina RT35. Fonte dati: Rubitherm Technical GmbH, Data sheet RT35.

La paraffina in questione è stata scelta in funzione dell’ampio *range* di temperatura di esercizio, evidenziato dal grafico di distribuzione dei valori di entalpia parziale in funzione della temperatura (Fig. 29). Questo ampio intervallo, dai 26 °C ai 41 °C, consente l’operatività prolungata del sistema durante una tipica giornata estiva per la zona climatica studiata (città di Torino).

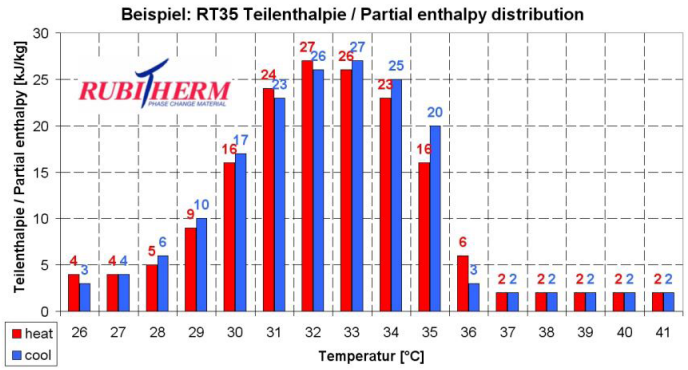


Fig. 29 Grafico del comportamento termico della paraffina RT35. Fonte immagine: Rubitherm Technical GmbH, Data sheet RT35.

Sfruttando le proprietà di accumulo termico per calore latente della paraffina, descritte nei capitoli precedenti, è possibile assorbire una parte del calore generato dall’irraggiamento solare all’interno dell’automobile, riducendone così la temperatura interna e i conseguenti discomfort. Il comportamento di questo nuovo materiale composito sarà valutato attraverso una fase sperimentale, affiancata da un modello di

simulazione dinamica.

4.2.2 Preparazione dei provini in laboratorio

I provini sono stati realizzati nel Laboratorio Sistemi Tecnologici Innovativi (LASTIN) del Politecnico di Torino.

In primo luogo, sono state effettuate ricerche di articoli che trattavano sperimentazioni inerenti composti PUR + PCM, per individuare percentuali di paraffina plausibili da integrare alla matrice poliuretanica. Tra le varie fonti indagate, si è riscontrato che Zhang et al.[50] hanno realizzato un prototipo a base di schiuma poliuretanica con paraffina microincapsulata, nelle percentuali variabili dal 7% al 27% in peso, da applicare come isolante termico nei settori tessile, *automotive* e farmaceutico. Bryant e Colvin[51] hanno sperimentato un composto di schiuma PUR, contenente dal 20% al 60% in peso di paraffina microincapsulata, per le medesime applicazioni. Fortunati et al.[52] hanno indagato prototipi con il 15%, 25% e 35% in peso di paraffina, da combinare con pannelli in poliuretano per tetti freddi.

I provini su cui sono state effettuate le prime prove, per indagare il comportamento dei due materiali in questione, hanno dimensioni pari a 10x10x10 cm, con una massa di circa 34 g ciascuno. Ogni provino è stato ricavato da un pannello più grande, tagliandolo delle dimensioni prefissate per mezzo di un seghetto a lama fine (Fig. 30).

Facendo riferimento ai dati raccolti dalla letteratura, abbiamo ipotizzato di realizzare quattro campioni con lo 0%, 15%, 30% e 45% in peso di paraffina. A causa della bassa densità della matrice poliuretanica (30 kg/m$^{3)}$, il quantitativo di PCM è risultato rispettivamente di 0 g, 5,1 g, 10,2 g e 15,3 g ma sarebbe stato insufficiente a garantire un'adeguata prestazione termica. Si è dunque optato per lavorare con percentuali di massa volumica, che accolgono un quantitativo maggiore di paraffina.

---

50 M.You, X.X.Zhang, J.P.Wang, X.C.Wang, *Polyurethane foam containing microencapsulated phase–change materials with styrene–divinylbenzene co–polymer shells*, Journal of Materials Science, vol 44 issue 12 (2009), pp. 3145.

51 Y.G. Bryant, D.P. Colvin, *Fabric with reversible enhanced thermal properties*, Triangle Research and Development Corporation, cod. US5366801A, Raleigh N.C. (1994).

52 A. L. Pisello, E. Fortunati, C. Fabiani, S. Mattioli, F. Dominici, L. Torre, L. F. Cabeza, F. Cotana, *PCM for improving polyurethane-based cool roof membranes durability*, Solar Energy Materials and Solar Cells, vol 160 (2017), p. 35.

Una volta ricalcolate le percentuali volumiche, abbiamo riscontrato che il 45% in volume rappresentava una quantità eccessiva. Abbiamo dunque realizzato un provino P1 10x10x10 cm imbibito di paraffina fusa al 15% in volume per analizzare il comportamento della matrice PUR con il PCM.

Per determinare la massa di PCM da inserire, è stata considerata la densità della paraffina allo stato liquido (0,77 g/cm^3 = 770 kg/m^3), anche per facilitare la fase di pesatura. Attraverso la formula:

$$m = d \cdot V \qquad [kg]$$

dove:

m= massa [kg];

d = densità [kg/m^3];

V = volume [m^3].

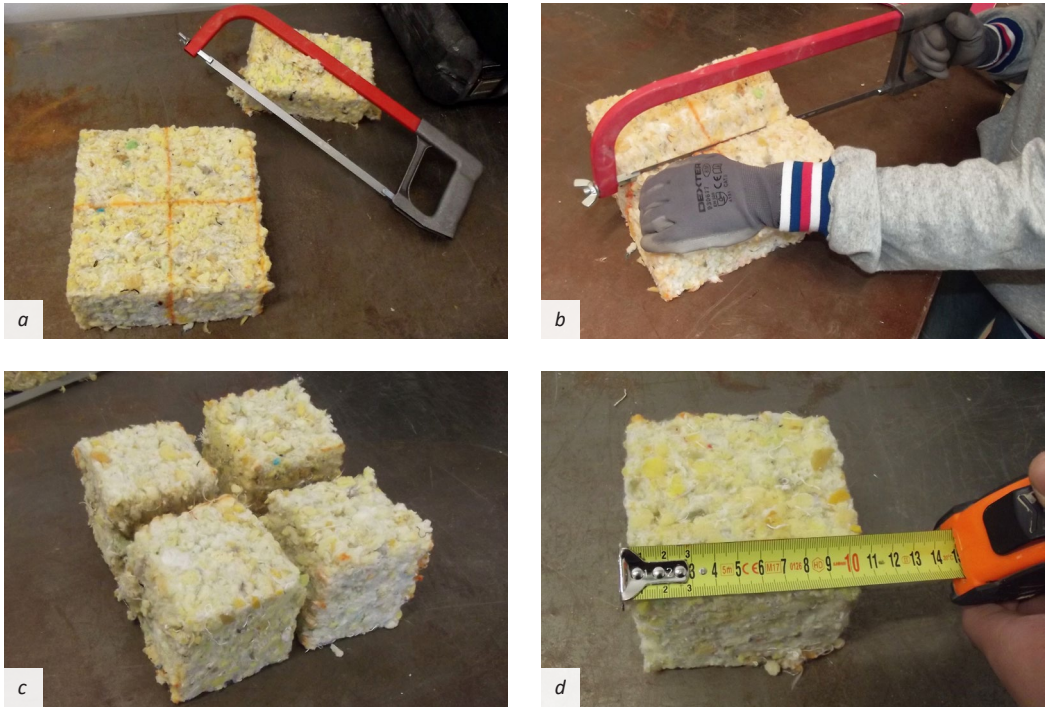


Fig. 30
a) materassino da tagliare e seghetto a lama fine;
b) taglio del materassino;
c) provini tagliati;
d) misurazione del provino.

Si è ricavata la quantità al 15% in volume:

$$m_{RT35,15\%} = (0,77 \cdot 1000) \cdot 15\% = 115,5 \qquad [g]$$

dove:

d_{RT35} = 0,77 g/cm^3;

V_{P1} = 1000 cm^3.

La paraffina è stata fusa nel forno del laboratorio, marca *Falc*, modello "STF-F 120" (Fig. 31a), alla temperatura costante di 50 °C per alcune ore, in modo tale da poterla versare in un diffusore (Fig. 31b), utilizzato per l'applicazione.

Fig. 31 a) Forno Falc "STF-F 120"; b) diffusore spray.

Contestualmente è stato pesato il provino di riferimento (Fig. 32a) e il diffusore, per verificare il corretto dosaggio della paraffina fusa. Una volta versata la paraffina fusa nel diffusore, è stata applicata tramite spray sul lato superiore del provino, fino ad ottenere la massa totale prefissata pari a 150,1 g (Fig. 32b).

$$m_{P1,RT35} = 34,6 + 115,5 = 150,1 \qquad [g]$$

dove:

m_{P1} = 34,6 g.

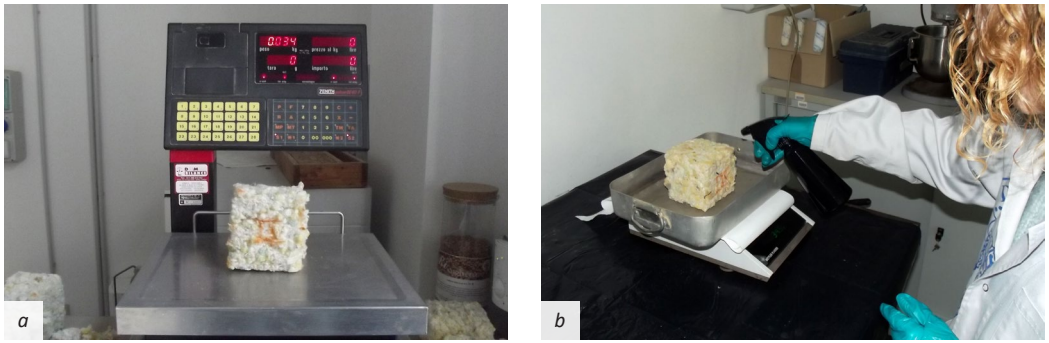


Fig. 32
a) pesatura del provino; b) imbibizione della paraffina fusa tramite spray.

In assenza di protocolli di sperimentazione su questi materiali, si è deciso di effettuare 10 cicli di fusione e congelamento a intervalli regolari di 30 minuti, per valutare le perdite di paraffina alla fine di ogni ciclo e l'accumulo di essa all'interno del provino. Durante la fase di fusione, il provino è stato inserito nel forno ad una temperatura costante di 50 °C, posto su una griglia che permette il percolamento della paraffina fusa in una teglia sottostante (Fig. 33a). La fase di congelamento, invece, è stata effettuata spostando il provino all'esterno del laboratorio, ad una temperatura di circa 2 °C (Fig. 33b). Alla fine di ogni ciclo di fusione/congelamento, il provino è stato pesato per quantificare le perdite di paraffina (Fig. 33c).

Fig. 33
a) fusione in forno; b) congelamento all'esterno; c) pesatura del provino P1 a fine di ogni ciclo.

Ciclo	Fase	Temperatura	Tempo	Massa P1	Perdite	Posizione
Ciclo 1	Fusione	T = 50 °C	τ = 30 min	$m_{P1,liq}$ = 150,1 g		
	Congelamento	T = 2 °C	τ = 30 min	$m_{P1,sol}$ = 147,5 g		
Ciclo 2	Fusione	T = 50 °C	τ = 30 min	$m_{P1,liq}$ = 146,0 g	$\Delta m_{P1,liq}$ = - 4,1 g	
	Congelamento	T = 2 °C	τ = 30 min	$m_{P1,sol}$ = 146,1 g		
Ciclo 3	Fusione	T = 50 °C	τ = 30 min	$m_{P1,liq}$ = 142,1 g	$\Delta m_{P1,liq}$ = - 3,9 g	
	Congelamento	T = 2 °C	τ = 44 ore	$m_{P1,sol}$ = 142,4 g		
Ciclo 4	Fusione	T = 50 °C	τ = 30 min	$m_{P1,liq}$ = 136,9 g	$\Delta m_{P1,liq}$ = - 5,2 g	
	Congelamento	T = 2 °C	τ = 30 min	$m_{P1,sol}$ = 137,0 g		
Ciclo 5	Fusione	T = 50 °C	τ = 30 min	$m_{P1,liq}$ = 135,1 g	$\Delta m_{P1,liq}$ = - 1,8 g	
	Congelamento	T = 2 °C	τ = 30 min	$m_{P1,sol}$ = 135,1 g		
Ciclo 6	Fusione	T = 50 °C	τ = 30 min	$m_{P1,liq}$ = 134,9 g	$\Delta m_{P1,liq}$ = - 0,2 g	
	Congelamento	T = 2 °C	τ = 30 min	$m_{P1,sol}$ = 134,9 g		
Ciclo 7	Fusione	T = 50 °C	τ = 30 min	$m_{P1,liq}$ = 133,9 g	$\Delta m_{P1,liq}$ = - 1,0 g	
	Congelamento	T = 2 °C	τ = 96 ore	$m_{P1,sol}$ = 134,0 g		
Ciclo 8	Fusione	T = 50 °C	τ = 30 min	$m_{P1,liq}$ = 132,4 g	$\Delta m_{P1,liq}$ = - 1,5 g	90°
	Congelamento	T = 2 °C	τ = 30 min	$m_{P1,sol}$ = 132,4 g		
Ciclo 9	Fusione	T = 50 °C	τ = 30 min	$m_{P1,liq}$ = 132,3 g	$\Delta m_{P1,liq}$ = -0,1 g	90°
	Congelamento	T = 2 °C	τ = 30 min	$m_{P1,sol}$ = 132,4 g		
Ciclo 10	Fusione 1	T = 50 °C	τ = 30 min	$m_{P1,liq}$ = 120,1 g	$\Delta m_{P1,liq}$ = - 12,2 g	45°
	Fusione 2	T = 50 °C	τ = 30 min	$m_{P1,liq}$ = 109,6 g	$\Delta m_{P1,liq}$ = - 10,5 g	

Tabella 4 Dati sui cicli di fusione/congelamento del provino P1.

Analizzando il comportamento del provino nei vari cicli, si è riscontrato che, già alla fine del ciclo 1, una porzione di paraffina si è accumulata per gravità nella parte inferiore del provino, come si vede dalle foto nella Fig. 34. Questa porzione rappresenta buona parte del PCM che il materiale non è in grado di trattenere. Tra il ciclo 1 e il ciclo 4, si è verificata una perdita media di 4 g, mentre dal ciclo 5 al ciclo 7 la perdita è diminuita, con un valore medio di 1 g a ciclo. Per verificare la reazione dell'accumulo di paraffina, si è deciso di ruotare il provino

di 90° all'inizio del ciclo 8 e di ulteriori 45° all'inizio del ciclo 10. La prima rotazione non ha manifestato perdite maggiori, in quanto la paraffina si è riaccumulata sul fondo, mentre la seconda rotazione, in cui il provino era posizionato con il vertice verso il basso, ha generato il rilascio di 22,7 g in un doppio ciclo di fusione.

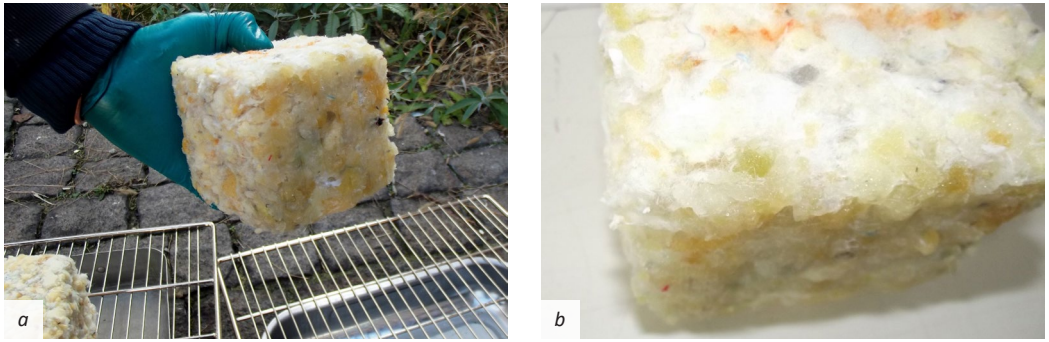


Fig. 34 a) illustrazione dell'accumulo di paraffina sul fondo del provino P1; b) dettaglio dell'accumulo.

Sommando le perdite alla fine dei 10 cicli, si è calcolato un totale di:

$$m_{RT35,perdite,P1} = 4,1 + 3,9 + 5,2 + 1,8 + 0,2 + 1 + 1,5 + 0,1 + 12,2 + 10,5 = 40,5 \qquad [g]$$

La paraffina trattenuta nel provino P1 è dunque pari a:

$$m_{RT35,trattenuta,P1} = 115,5 - 40,5 = 75 \qquad [g]$$

Dopo 10 cicli di fusione e congelamento, abbiamo riscontrato che la percentuale in volume di paraffina contenuta nel provino è passata dal 15% al 9,75%.

A seguito dei risultati ottenuti dal primo provino, si è scelto di realizzare un secondo provino P2 delle stesse dimensioni (10x10x10 cm), ma con un contenuto di paraffina pari al 7,5% in volume. La paraffina è stata addizionata, come nel caso precedente, tramite spray.

La quantità di PCM al 7,5% in volume è pari a:

$$m_{RT35,7,5\%} = (0,77 \cdot 1000) \cdot 7,5\% = 57,75 \qquad [g]$$

dove:

d_{RT35} = 0,77 g/cm$^{3;}$

$V_{P2} = V_{P1}$ = 1000 cm$^{3.}$

Il provino P2, imbibito di paraffina al 7,5% in volume, ha una massa complessiva di:

$$m_{P2,RT35} = 34,7 + 57,75 = 92,45 \quad [g]$$

dove:

m_{P2} = 34,7 g.

Per questo provino sono stati effettuati 6 cicli di fusione e congelamento, alle medesime condizioni del provino P1. Confrontando la massa teorica con quella misurata prima del ciclo 1, si misura un eccesso di paraffina di 0,15 g.

Ciclo	Fase	Temperatura	Tempo	Massa P1	Perdite	Posizione
Ciclo 1	Fusione	T = 50 °C	τ = 30 min	$m_{P1,liq}$ = 92,6 g		
	Congelamento	T = 2 °C	τ = 30 min	$m_{P1,sol}$ = 88,6g		
Ciclo 2	Fusione	T = 50 °C	τ = 30 min	$m_{P1,liq}$ = 85,0 g	$\Delta m_{P1,liq}$ = - 7,6 g	
	Congelamento	T = 2 °C	τ = 30 min	$m_{P1,sol}$ = 85,0 g		
Ciclo 3	Fusione	T = 50 °C	τ = 30 min	$m_{P1,liq}$ = 84,7 g	$\Delta m_{P1,liq}$ = - 0,3 g	
	Congelamento	T = 2 °C	τ = 96 ore	$m_{P1,sol}$ = 84,4 g		
Ciclo 4	Fusione	T = 50 °C	τ = 30 min	$m_{P1,liq}$ = 83,9 g	$\Delta m_{P1,liq}$ = - 0,8 g	
	Congelamento	T = 2 °C	τ = 30 min	$m_{P1,sol}$ = 84,0 g		
Ciclo 5	Fusione	T = 50 °C	τ = 30 min	$m_{P1,liq}$ = 83,7 g	$\Delta m_{P1,liq}$ = - 0,2 g	
	Congelamento	T = 2 °C	τ = 30 min	$m_{P1,sol}$ = 84,0 g		
Ciclo 6	Fusione	T = 50 °C	τ = 30 min	$m_{P1,liq}$ = 83,0 g	$\Delta m_{P1,liq}$ = - 0,7 g	
	Congelamento	T = 2 °C	τ = 30 min	$m_{P1,sol}$ = 83,2 g		

Tabella 5 Dati sui cicli di fusione/congelamento del provino P2.

Il provino P2 è stato sottoposto ad un numero di cicli inferiore rispetto al P1, poiché, dopo una perdita di 7,6 g al termine del ciclo 1, ha perso in maniera quasi costante meno di 1 g a ciclo fino al termine del ciclo 6. Questo provino non è stato sottoposto a rotazioni, in quanto non si sono manifestati grossi accumuli nella parte inferiore.

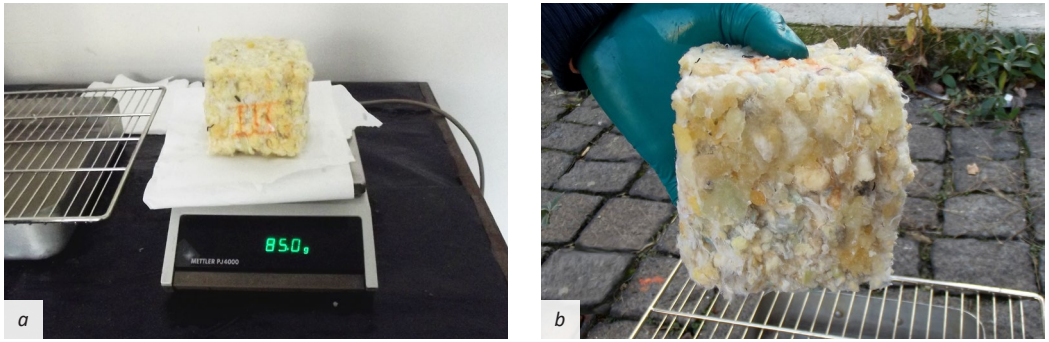


Fig. 35 a) pesatura del provino P2 al ciclo 2; b) illustrazione dell'accumulo di paraffina sul fondo del provino P2.

La perdita totale di paraffina nel provino P2 è pari a:

$$m_{RT35,perdite,P2} = 7,6 + 0,3 + 0,8 + 0,2 + 0,7 = 9,6 \quad [g]$$

La paraffina trattenuta nel provino P2 è pari a:

$$m_{RT35,trattenuta,P2} = 57,75 + 0,15 - 9,6 = 48,3 \quad [g]$$

Al termine dei 6 cicli di fusione e congelamento, abbiamo misurato che la percentuale in volume di paraffina contenuta nel provino P2 è variata dal 7,5% al 6,25%.

4.2.3 I campioni NBT

A valle della realizzazione dei provini in laboratorio e dei comportamenti appurati, abbiamo confermato le ipotesi iniziali sulla compatibilità dei due materiali. La matrice poliuretanica, infatti, ha dimostrato una buona capacità di assorbimento del PCM fuso, grazie all'elevata porosità della schiuma e alle fibre naturali e sintetiche contenute al suo interno. Analizzando i provini, si vede che il materassino di partenza è stato in grado di trattenere circa il doppio del suo peso in paraffina. Durante la fase di laboratorio, non si sono rilevate reazioni tra i due materiali come emissioni di fumi, disgregazioni o cambiamenti di pigmentazione: si può dunque affermare che non ci siano incompatibilità chimiche, essendo entrambi materiali chimicamente inerti. Dal momento che il PCM ha occupato i vuoti della struttura porosa del materassino, quest'ultimo ha aumentato la sua densità e la sua resistenza a compressione durante la fase solida.

Per rendere applicabile il prototipo, i campioni NBT dovranno essere contenuti all'interno di un involucro plastico sottovuoto. In questo modo, si consente la manovrabilità del campione e si evitano dispersioni durante la fase fusa.

Le dimensioni dei campioni definitivi, pari a 25x35x5 cm, sono state determinate dalla capacità massima dello strumento di sigillatura sottovuoto e sono adatte alla misurazione della conducibilità termica attraverso l'*Heat Flow Meter*.

Di seguito sono tabulati i valori relativi a ciascun campione (Tab. 6):

Campione	Dimensioni	Volume campione	% in vol di RT35	Massa di RT35	Massa tot campione	Densità campione
NBT0	25x35x5 cm	4.375 cm^3	0 % in vol	0,00 kg	0,131 kg	30 kg/m^3
NBT1	25x35x5 cm	4.375 cm^3	15 % in vol	0,505 kg	0,636 kg	145,5 kg/m^3
NBT2	25x35x5 cm	4.375 cm^3	30 % in vol	1,010 kg	1,141 kg	261 kg/m^3

Tabella 6 Caratteristiche dei campioni NBT con spessore di 5 cm.

Per tagliare i pannelli delle dimensioni stabilite, ci siamo avvalsi dell'aiuto di un'impresa artigiana che tratta materiali imbottiti, la *Marinflex*, sita a Ciriè (TO). L'azienda ha gentilmente messo a disposizione il proprio macchinario per tagliare su misura i pannelli a nostra disposizione. Da due pannelli 65x40x10 sono stati ottenuti otto pannelli più piccoli. Due costituiscono i campioni NBT0, mentre due serviranno per la realizzazione dei campioni NBT1 e altri due per gli NBT2 (Fig. 36).

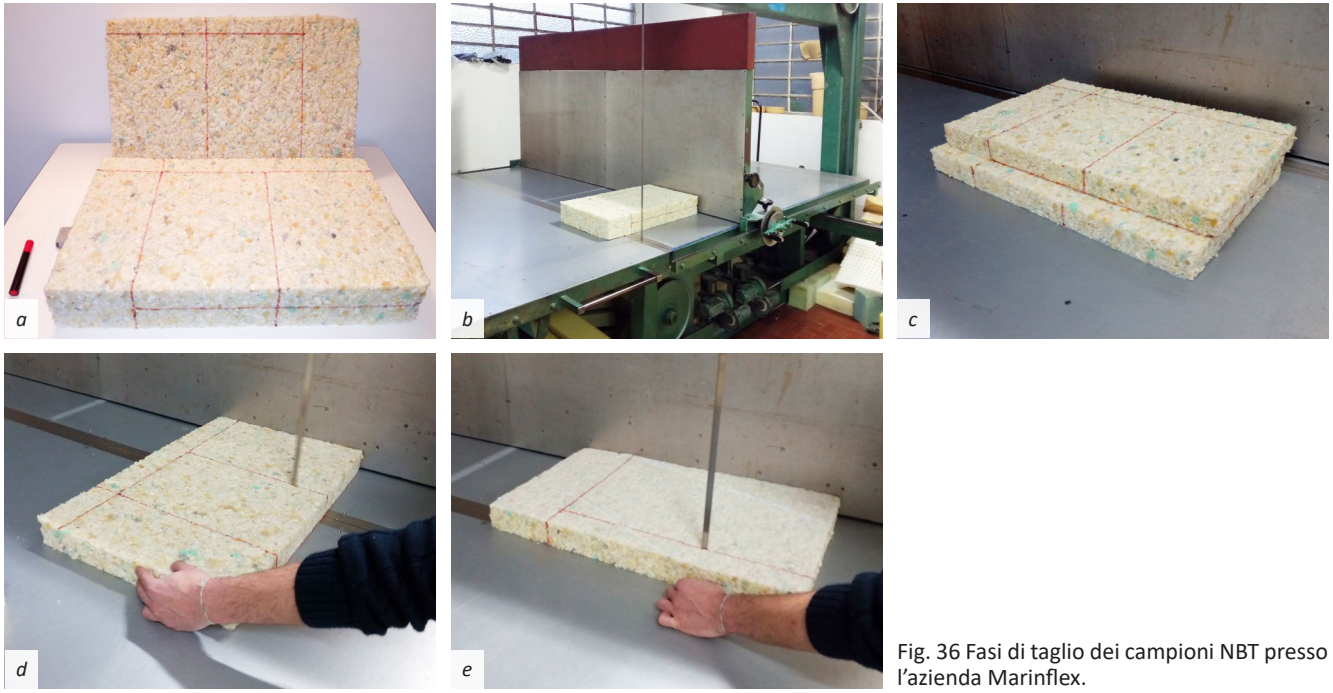


Fig. 36 Fasi di taglio dei campioni NBT presso l'azienda Marinflex.

Sono stati realizzati due campioni per ogni tipologia per permettere la successiva misurazione attraverso l'*Heat Flow Meter*. Affiancandoli, si ricopre la superficie richiesta dallo strumento, che necessita una superficie continua di almeno 35x35 cm.

L'assorbimento della percentuale di paraffina dei campioni NBT1 e NBT2 è stato realizzato presso il laboratorio LASTIN. Una volta fusa la paraffina in forno alla T = 50 °C, è stata quantificata e pesata la percentuale in volume

di PCM da inserire nei campioni e poi versata in un contenitore per l'imbibizione. I campioni sono stati immersi da entrambi i lati fino al completo assorbimento della paraffina. In seguito, sono stati condotti all'esterno ad una T = 5 °C per consentire la completa solidificazione della paraffina (Fig. 37).

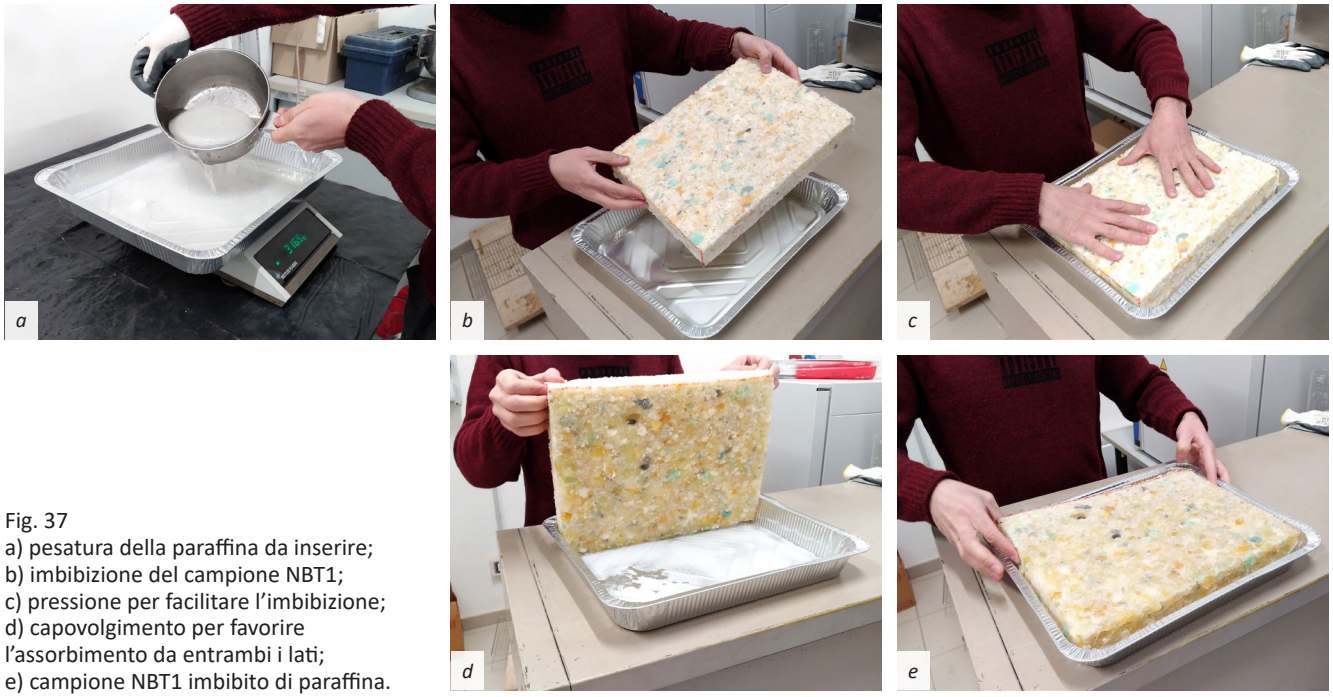


Fig. 37
a) pesatura della paraffina da inserire;
b) imbibizione del campione NBT1;
c) pressione per facilitare l'imbibizione;
d) capovolgimento per favorire l'assorbimento da entrambi i lati;
e) campione NBT1 imbibito di paraffina.

Dopo 30 minuti, i campioni solidificati sono stati ricondotti all'interno del laboratorio e sono stati pesati, prima di essere insacchettati per la messa in sottovuoto. Attraverso il sistema sottovuoto si mutano lo spessore e la densità del campione finora ottenuto, per adeguarlo al concept scelto per il prototipo. Lo strumento utilizzato è il "Vacuum Seales VS3801" della *Bonsenkitchen* (Fig. 38). Lo spessore è stato ridotto da 5 a 3 cm e la densità è aumentata conseguentemente del 60%.

Fig. 38
a) inserimento del campione nel sacchetto per il sottovuoto; b) misurazione dello spessore del campione NBT1 sottovuoto; c) campione NBT1 sottovuoto.

Di seguito sono riportati i valori relativi ai campioni NBT definitivi (Tab. 7):

Campione	Dimensioni	Volume campione	% in vol di RT35	Massa di RT35	Massa tot campione	Densità campione
NBT0	25x35x3 cm	2.625 cm^3	0 % in vol	0,00 kg	0,131 kg	50 kg/m^3
NBT1	25x35x3 cm	2.625 cm^3	25 % in vol	0,505 kg	0,636 kg	242,5 kg/m^3
NBT2	25x35x3 cm	2.625 cm^3	50 % in vol	1,010 kg	1,141 kg	435 kg/m^3

Tabella 7 Caratteristiche dei campioni NBT sottovuoto con spessore di 3 cm.

I due capitoli successivi analizzeranno i campioni NBT sia dal punto di vista termico, attraverso strumenti di misurazione diretta (*Heat Flow Meter*), che applicativo, con l'ausilio del software di modellazione termica in regime dinamico WUFI® Plus.

5

MISURAZIONE DELLE PRESTAZIONI TERMICHE

Nella fase successiva, i prototipi NBT0 e NBT1 sono stati analizzati sotto il profilo termico, in accordo con le normative UNI EN 12667:2002 e ISO 8301:1991, utilizzando un *Heat Flow Meter* realizzato dall'azienda americana *LaserComp*, in particolare il modello "Fox 600". Lo strumento, in dotazione del Laboratorio del Dipartimento Energia (DENERG) del Politecnico di Torino, permette di determinare i valori di conducibilità termica ed entalpia in funzione della temperatura per il campione sottoposto a lettura.

L'*Heat Flow Meter* è costituito da due piastre orizzontali (una inferiore e una superiore) riscaldate a temperature diverse, da due trasduttori di flusso di calore e da un involucro isolante che limita le dispersioni termiche. Il campione da misurare è inserito all'interno dello strumento tra le due piastre. Queste possono essere posizionate ad una distanza predefinita dall'utente, oppure utilizzando l'opzione "AutoThickness", attraverso la quale la piastra superiore si sposta automaticamente fino al contatto con il campione da misurare. Lo spessore è misurato attraverso quattro *encoder* ottici, che forniscono misure stabili fino a 0,025 mm. Dallo schermo digitale presente sullo strumento è possibile leggere lo spessore raggiunto.

La differenza di temperatura tra le due piastre genera un flusso di calore passivo che attraversa il campione e che è misurato dai due trasduttori di flusso di calore presenti, aventi una superficie di misurazione pari a 254x254 mm. L'*Heat Flow Meter* "Fox 600" può analizzare un campione di dimensioni massime di 600x600 mm, con uno spessore massimo di 203 mm (Fig. 39).[53]

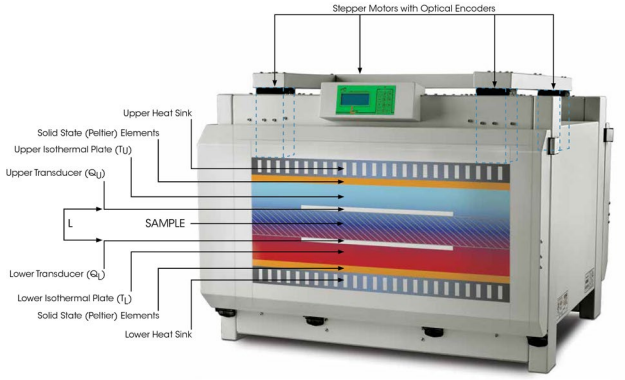


Fig. 39 Heat Flow Meter "Fox 600". Fonte immagine: TA Instrument, Thermal Conductivity Instruments, https://www.tainstruments.com/wp-content/uploads/BROCH-LC-2015-EN-1.pdf

53 TA Instrument, *LaserComp Fox 600*, https://www.tainstruments.com/fox-600/#ffs-tabbed-14

5.1 Conducibilità termica (λ)

Lo strumento di misurazione del flusso termico è stato utilizzato per conoscere, innanzi tutto, la conducibilità del materassino di partenza fornito da *Secondly*. Il campione NBT0 delle dimensioni ottenute in laboratorio (25x35x5 cm) è inferiore alle dimensioni necessarie allo strumento per effettuare la lettura, così è stato necessario affiancare due campioni NBT0 per ottenere una lettura continua su una superficie pari a 50x35 cm (Fig. 40a).

Una volta stabilita la posizione all'interno dello strumento, al centro delle piastre di lettura (Fig. 40b), è stata impostata nello strumento la distanza delle due piastre, pari a 3 cm. La piastra superiore si è abbassata comprimendo il campione di 5 cm di spessore fino a raggiungere la quota indotta dall'utente. Lo spessore raggiunto è pari a 30,42 mm (Fig. 40c).

Fig. 40 a) due campioni NBT0 affiancati; b) inserimento dei campioni NBT all'interno dell'Heat Flow Meter "Fox 600"; c) determinazione dello spessore di misurazione del campione.

Attraverso il software Wintherm32, sono stati inseriti i parametri necessari a eseguire il calcolo della conducibilità termica (λ). Gli strumenti di misurazione del flusso di calore determinano la conducibilità termica di un materiale basandosi sull'equazione monodimensionale per la legge di Fourier in condizioni stazionarie:

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{s}{\lambda}} \qquad \left[\frac{W}{m^2}\right]$$

dove:

Q = flusso di calore che attraversa il campione [W/m^2];

ΔT = differenza di temperatura tra la piastra superiore e la piastra inferiore [°C];

s = spessore del campione [m];

λ = conducibilità termica [W/mK].

Gli input determinanti per il calcolo sono, dunque, lo spessore del campione, la differenza di temperatura tra le due piastre e il flusso di calore che attraversa il campione. Una volta associato lo spessore, si passa a determinare le temperature a cui fissare le due piastre. In questa misurazione, la piastra superiore è stata fissata a 13 °C, mentre quella inferiore a 33 °C, determinando così una differenza di temperatura pari a 20 °C. Per quanto riguarda il flusso termico che attraversa il materiale, è stata impostata una differenza percentile inferiore al 2% tra il flusso superiore ed inferiore, misurato in microVolt [µV].

Al software è associato un file di calibrazione, in funzione del materiale da misurare, attraverso il quale si inseriscono delle informazioni relative ad un materiale standard misurato, di conduttività nota, che il programma utilizza come riferimento per determinare l'incognita al variare delle temperature inserite. Attraverso il fattore di calibrazione, il programma converte i flussi nelle due piastre da µV a W/m^2.

La misurazione del prototipo NBT0 è stata effettuata in 83 minuti. Una volta raggiunta la condizione stazionaria in entrambe le piastre, il software registra nel report generato le ultime dieci misurazioni e dalle cinque finali ricava:

- il flusso di calore superiore e inferiore, ottenuto come media dei valori [W/m^2];
- la temperatura registrata nella piastra superiore e inferiore [°C];
- la temperatura media [°C];
- la conducibilità termica media [W/mK];

- la resistenza termica media [mK/W].

Il valore di conducibilità termica medio registrato per il campione NBT0 è pari a:

$$\lambda_{NBT0} = 0{,}03657 \qquad \left[\frac{w}{mk}\right]$$

approssimabile a:

$$\boldsymbol{\lambda_{NBT0} = 0{,}037} \qquad \left[\frac{w}{mk}\right]$$

Il valore ottenuto dalla misurazione dimostra che il materassino riciclato può essere impiegato come materiale isolante in edilizia, in sostituzione di isolanti tradizionali. La sua conducibilità termica è, infatti, paragonabile a quella dei pannelli in lana di roccia (λ = 0,037 W/mK), in polistirene espanso XPS (λ = 0,036 W/mK), in lana di pecora (λ = 0,037 W/mK) e in fibre di legno (λ = 0,038 W/mK).[54]

La stessa misurazione è stata effettuata per i due campioni NBT1, per determinare la conducibilità termica del materiale composto con il 25% in volume di paraffina RT 35. Lo spessore raggiunto dallo strumento per questi campioni è di 33,53 mm. Per questa misurazione sono stati impostati i seguenti parametri:

- Temperatura della piastra superiore (*Setpoint Upper*) T_U = 15,00 °C;
- Temperatura della piastra inferiore (*Setpoint Lower*) T_L = 25,00 °C;
- Differenza percentile fra il flusso di calore superiore e inferiore < 2%;
- Report delle ultime dieci misurazioni;
- Calcolo effettuato sulle ultime cinque misurazioni registrate.

54 E. Carattin, M. Franz, S. Luciano (a cura di), *Materiali isolanti. Nuove tendenze in architettura*, Università Iuav di Venezia, Archivio delle Tecniche e dei Materiali per l'architettura e il disegno industriale, pp. 1-67.

Al termine della misurazione, durata 143 minuti, è stato possibile determinare il valore di conducibilità termica medio per il campione NBT1, pari a:

$$\lambda_{NBT1} = 0{,}05952 \qquad \left[\frac{w}{mk}\right]$$

approssimabile a:

$$\boldsymbol{\lambda_{NBT1} = 0{,}059} \qquad \left[\frac{w}{mk}\right]$$

5.2 Entalpia in funzione della temperatura (h)

Lo strumento per la misurazione del flusso di calore può essere utilizzato anche per determinare un altro valore fondamentale, in particolare per i composti che contengono PCM: la variazione di entalpia (h) in funzione della temperatura. Secondo lo standard indicato dalla norma internazionale ASTM C1784 del 2014, è possibile individuare l'energia immagazzinata (entalpia) nel campione su un intervallo di temperatura stabilito, attraverso la lettura della quantità di calore assorbita da questo. In particolare, questo metodo di prova è indicato per misurare la capacità di accumulo di calore sensibile e latente dei prodotti che incorporano materiali a cambiamento di fase. Per fare ciò, è necessario definire dei parametri differenti a quelli utilizzati per determinare la conducibilità termica.

Innanzitutto, bisogna fissare entrambe le piastre dello strumento alla medesima temperatura. Una volta raggiuta la condizione stazionaria, si incrementa o si diminuisce di un certo valore la temperatura di entrambe le piastre e si legge la quantità di calore che viene assorbita o rilasciata dal campione, fino al raggiungimento di un nuovo stato stazionario.

La capacità di assorbire o rilasciare calore, ad ogni intervallo di temperatura, è determinata dal calore specifico volumetrico del campione $c_p\rho$ misurato in J/m^3K. L'obiettivo del test è misurare il calore specifico volumetrico del prototipo NBT1 durante la transizione di fase del PCM, da solido a liquido o viceversa, in modo da determinare la distribuzione dell'entalpia parziale riferita ad ogni temperatura [kJ/kgK] e l'entalpia cumulata [kJ/kg].

Per determinare l'effettiva capacità del campione di assorbire calore, bisogna, però, sottrarre all'equazione la quantità di calore che viene assorbita dalle piastre di misurazione e dai materiali isolanti dello strumento. Una volta determinato questo valore si applica al software attraverso dei file di calibrazione, che isolano il quantitativo di calore assorbito dallo strumento, per riportare unicamente il valore di entalpia del campione.

Per effettuare la misurazione del campione NBT1, contenente la paraffina RT 35, sono state imposte allo strumento 18 misurazioni, con un primo *Setpoint* fissato a 24,5 °C e un ultimo *Setpoint* fissato a 41,5 °C, per determinare l'entalpia durante la transizione di fase della paraffina da solida a liquida. Ad ogni misurazione, la

temperatura è stata incrementata di 1 °C. Le temperature sono state scelte in base a quelle indicate nel grafico di entalpia parziale fornito dalla *Rubitherm GmbH* per la paraffina RT 35, in modo da poter mettere a confronto il grafico dell'entalpia in funzione della temperatura della sola paraffina con quello del campione NBT1 e valutare in modo diretto le eventuali perdite di prestazione.

Ad ogni lettura è stato registrato un valore medio di temperatura, a cui corrisponde un valore medio di calore specifico volumetrico del campione. Per ottenere l'entalpia specifica in funzione della temperatura da questi valori, è necessario dividere il calore specifico volumetrico registrato per la densità del campione. La densità del prototipo NBT1 è $\rho = 242{,}50\ kg/m^3$.

I risultati delle analisi del prototipo NBT1 hanno confermato l'andamento generale della curva di entalpia in funzione della temperatura, rispetto ai dati dichiarati dalla *Rubitherm GmbH*. Come mostrato nei grafici delle Fig. 41 e 42, si evince, però, una diminuzione della capacità di accumulo termico del PCM, soprattutto nelle temperature in cui si registra l'accumulo maggiore.

L'entalpia totale del campione NBT1 è pari a:

$$\boldsymbol{h_{NBT1} = 133{,}12} \qquad \left[\frac{KJ}{kg}\right]$$

contro il valore di 160 KJ/kg dichiarato nella scheda tecnica della paraffina RT35.

Nel range di temperatura tra i 30 °C e i 35 °C si è riscontrato un abbassamento sostanziale di capacità di accumulo di calore, con diminuzioni di entalpia parziale anche di 10 kJ/kgK. Il valore massimo di entalpia si è raggiunto, sia per il prototipo NBT1 che per la sola paraffina RT 35, alla temperatura di 32 °C. Per il prototipo NBT1 si registra un valore di:

$$h_{NBT1,32\,°C} = 17{,}61 \qquad \left[\frac{KJ}{kgK}\right]$$

mentre per la paraffina RT35:

$$h_{RT35,32\,°C} = 27{,}00 \qquad \left[\frac{KJ}{kgK}\right]$$

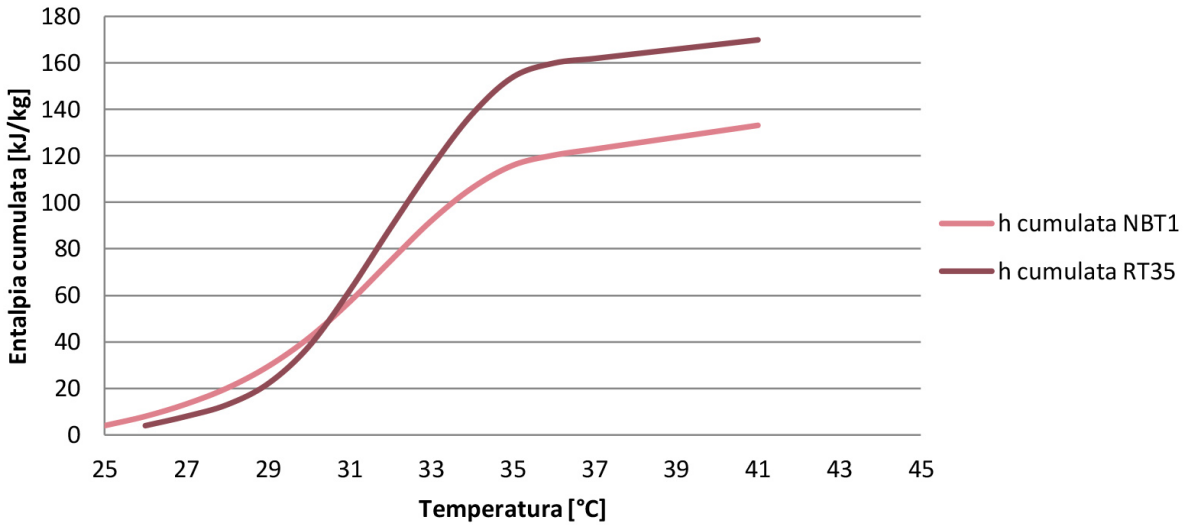


Fig. 41 Grafico dell'entalpia cumulata nella fase di fusione del prototipo NBT1 e della paraffina RT 35.

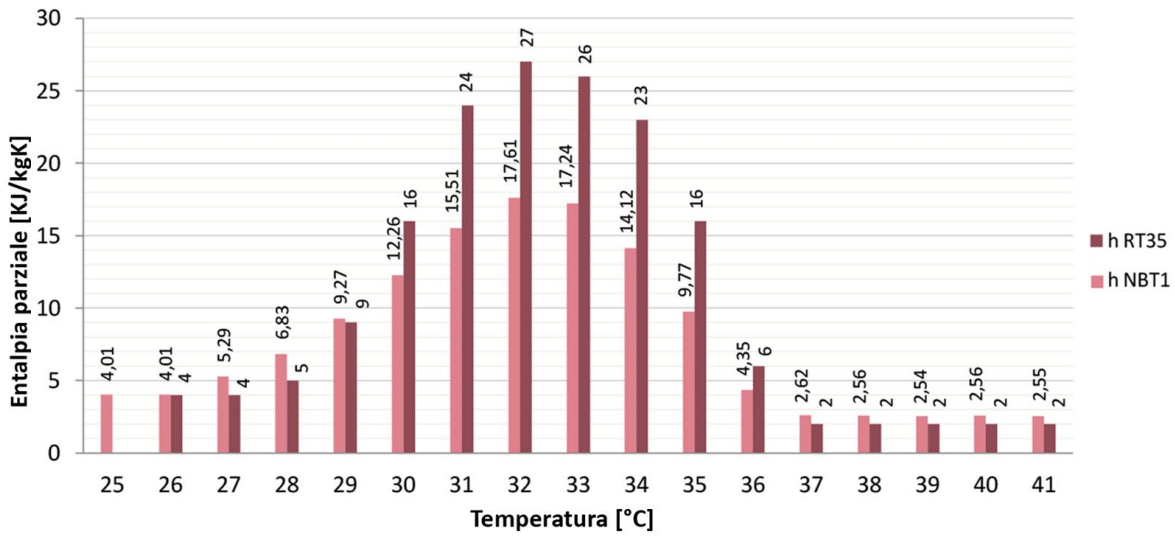


Fig. 42 Grafico di confronto dell'entalpia parziale nella fase di fusione del prototipo NBT1 e della paraffina RT 35.

6

MODELLAZIONE ENERGETICA DINAMICA

6.1 Il software WUFI Plus

Lo strumento utilizzato in questa tesi per analizzare il modello di riferimento sotto l'aspetto energetico è il software WUFI® Plus v. 3.1.1.0.

Questo software permette di simulare le condizioni termo-igrometriche dinamiche di un ambiente, date le caratteristiche del clima esterno e della composizione delle varie parti che lo costituiscono. Attraverso l'elaborazione dei dati, il software consente di effettuare valutazioni relative al comfort termico, al clima interno, alla qualità dell'aria e alle condizioni igieniche che si verificherebbero in un determinato luogo confinato.

WUFI® Plus è utilizzato inoltre per calcolare il fabbisogno di energia di riscaldamento e di raffrescamento di un edificio, nonché per quantificare la richiesta di umidificazione o di deumidificazione, utilizzando il clima esterno, i modelli di occupazione e i sistemi HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*) come parametri di riferimento.

In questa ricerca, il software è stato utilizzato per ricreare le condizioni interne generate all'interno di un autoveicolo durante la stagione estiva.

6.2 Il modello

Il modello di auto preso come riferimento è una Volkswagen Polo V serie del 2017 di colore grigio scuro, illustrata nella foto seguente (Fig. 43).

Fig. 43 Fotografia dell'automobile oggetto di analisi: Volkswagen Polo.

Facendo fede alle dimensioni messe a disposizione dalla casa costruttrice e a misurazioni dirette, il profilo del veicolo è stato ridisegnato con il software AutoCAD in modo semplificato, rendendo piane le superfici curve. Nella figura seguente si riporta la geometria del modello con le relative quote in centimetri (Fig. 44).

Dal precedente disegno si può notare che è stata esclusa dal modello la parte anteriore relativa al motore e il bagagliaio, in quanto non oggetto di analisi in questa tesi. Si è preso in considerazione, infatti, solamente l'abitacolo

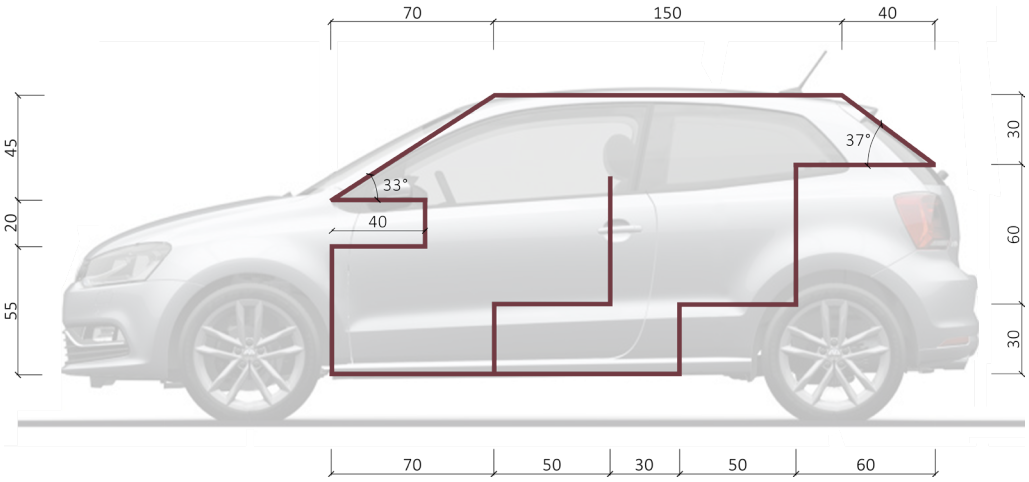


Fig. 44 Geometria semplificata dell'automobile. Misure in centimetri.

del veicolo, ossia lo spazio interno riservato al conducente e ai passeggeri.

In seguito, dal profilo semplificato, è stato elaborato un modello tridimensionale dell'auto utilizzando il software SketchUp.

Nel modello sono state individuate due zone climatiche diverse, una anteriore (Z1) e una posteriore (Z2), divise al livello dei sedili anteriori. Per ciascuna zona climatica sono state individuate le relative superfici opache e trasparenti. Tale suddivisione permetterà di analizzare il microclima generato all'interno dell'abitacolo nella zona anteriore e posteriore, essendo il rapporto superfici finestrate/superfici totali diverso tra una zona e l'altra.

La figura seguente (Fig. 45) mostra il modello tridimensionale dell'abitacolo e identifica, con colori diversi, le due zone climatiche: la Z1 in rosso e la Z2 in verde.

La tabella seguente presenta le caratteristiche geometriche del modello analizzato per ciascuna zona climatica (Tab. 8). Si esplicita che, la voce "superfici opache interne" fa riferimento alle superfici dei sedili anteriori che dividono le due zone climatiche.

Caratteristiche geometriche	**Z1**	**Z2**	**Totale**
Superfici opache esterne	5,06 m^2	6,34 m^2	**10,40 m^2**
Superfici opache interne	1,42 m^2	-	**1,42 m^2**
Superfici trasparenti	1,89 m^2	1,64 m^2	**3,53 m^2**
Volume	1,42 m^3	1,46 m^3	**2,88 m^3**

Tabella 8 Caratteristiche geometriche del modello.

Attraverso la Tab. 8 si può notare che il modello oggetto di studio ha una prevalenza di superfici opache rispetto a quelle trasparenti e ha un volume interno totale pari a 2,88 $m^{3.}$ Mettendo a confronto le due zone climatiche, il loro volume risulta circa equivalente, ma le superfici trasparenti hanno percentuali differenti: la Z1 presenta una superficie finestrata pari al 27% sul totale delle superfici disperdenti verso l'esterno, mentre la Z2 ha una superficie trasparente inferiore, pari al 20%. Questa differenza è giustificata dal fatto che nella Z1 è presente il parabrezza, che da solo ricopre una superficie di 1,12 m^2.

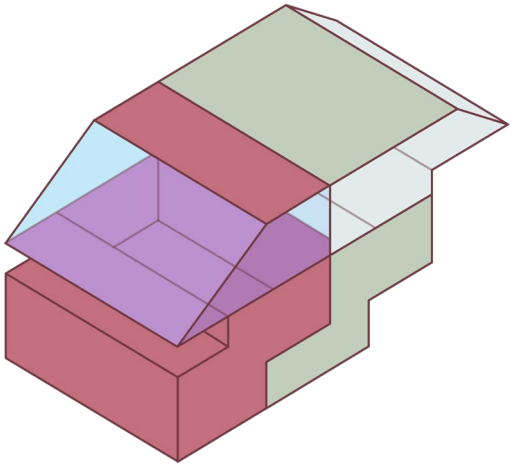


Fig. 45 Modello 3D dell'abitacolo.

Definito l'aspetto geometrico, il modello è stato importato nel software WUFI® Plus, per definire le stratigrafie di ciascun componente e successivamente poter analizzare le caratteristiche termiche in regime dinamico, generate all'interno dell'abitacolo.

In primo luogo, è stata definita la geolocalizzazione del modello. Grazie ai database del software, inserendo la città di riferimento, sono inseriti in modo automatico tutti i parametri relativi alle coordinate geografiche e ai dati climatici, come la temperatura dell'aria esterna (°C) e l'umidità relativa (%). Il caso studio è stato analizzato riferendosi ai parametri della città di Torino nella stagione estiva (21 giugno - 23 settembre).

L'immagine seguente riporta l'andamento delle temperature e dell'umidità relativa giornaliere registrate a Torino nell'anno 2004, anno di riferimento per il software (Fig. 46).

Dalla Fig. 46 si può riscontrare che la temperatura massima registrata a Torino è pari a 34,5 °C nel giorno 27 Luglio, mentre l'umidità relativa, che durante l'anno raggiunge anche il 100%, nel periodo estivo ha un valore medio di circa il 60%.

Il calcolo eseguito in questa tesi è di tipo termico, che analizza le variazioni di temperatura all'interno del veicolo in funzione della temperatura esterna, trascurando i valori di umidità relativa. Il periodo analizzato, come già detto, è il periodo estivo, precisamente dal 21 giugno 2018 ore 00:00 al 23 settembre 2018 ore 00:00, con un passo di calcolo orario (1 ora). È stato inoltre richiesto al software di

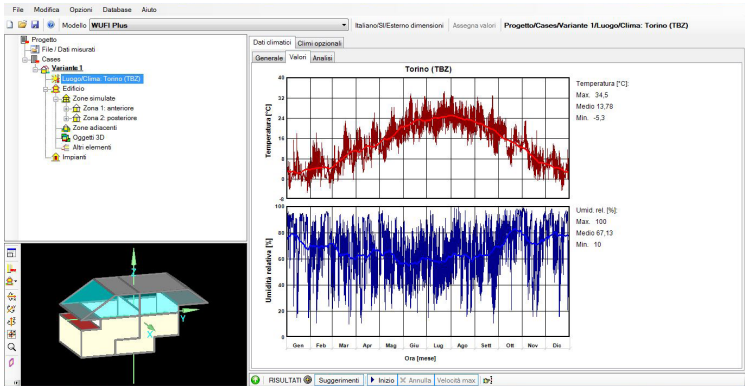


Fig. 46 Andamento della temperatura e dell'umidità relativa a Torino nell'anno 2004. Fonte immagine: WUFI® Plus.

considerare un periodo di calcolo preliminare di 5 giorni, per generare condizioni iniziali omogenee.

Il modello digitale è stato orientato con il parabrezza verso Sud (superficie trasparente maggiore) e non sono stati previsti, durante l'intera fase di analisi, scambi d'aria per ventilazione tra l'abitacolo e l'aria esterna, né ombreggiamento dell'auto durante la giornata (coefficiente costante = 1), in modo da porsi nelle condizioni più svantaggiate. Non sono stati presi in considerazione, inoltre, eventuali apporti di calore interni dovuti alla presenza di persone nell'auto. Il software registra, a Torino, un valore massimo di irraggiamento solare globale di 1058 W/m^2 nel giorno 13 luglio alle ore 14:00.

Il valore di emissività del terreno inserito è $\varepsilon = 0,9$, paragonabile a quello di una pavimentazione in asfalto.

Ciascun elemento del modello è stato identificato come componente "opaco", "trasparente" o "apertura" e, sempre per ciascuno di essi, sono state selezionate le zone adiacenti alle superfici interne ed esterne, a scelta tra "Z1", "Z2", "aria esterna", "terreno" o "stanza con le stesse condizioni interne". A titolo di esempio, l'elemento "portiera anteriore" è un componente opaco, appartenente alla Z1 e confinante con l'aria esterna.

Nel modello, gli elementi opachi corrispondono alle portiere, al pianale, al cielo, al cruscotto e ai sedili, mentre gli elementi trasparenti sono le superfici vetrate del parabrezza, dei finestrini e del lunotto posteriore. Sono state individuate, inoltre, due elementi "apertura": uno nello spazio verticale che intercorre tra lo schienale dei sedili anteriori e il cielo dell'auto, l'altro nello spazio sotto i sedili anteriori. Esse hanno la funzione di scambio d'aria tra la Z1 e la Z2. Le aperture hanno una superficie rispettivamente di 0,47 m^2 e 0,41 m^2, e sono intese come elementi fittizi caratterizzati da un elevato valore di scambio d'aria, pari a 15 m^3/h, al fine di rendere il più omogeneo possibile il microclima tra le due zone del modello. Per semplificazione, le superfici del cruscotto (adiacenti al motore) e dei sedili posteriori (adiacenti al bagagliaio) sono state considerate adiabatiche, ossia superfici che non generano scambi di calore, perché a contatto con zone con le medesime condizioni interne. Le superfici adiabatiche della Z1 sono di 1,35 m^2 e della Z2 di 2,71 m^2, con un totale di 4,06 m^2.

Per ciascun elemento è stata definita, infine, una stratigrafia selezionando ogni materiale con le relative caratteristiche. Sono stati impostati, quindi, con l'ausilio del database di materiali di WUFI® Plus, i valori di

conducibilità termica (λ), densità (ρ), calore specifico (cp) e spessore (s) di ciascun layer. Il software calcola in automatico resistenza termica (R), trasmittanza (U) e spessore totale di ogni elemento.

Le superfici opache del modello, in relazione al colore grigio scuro dell'automobile utilizzata come riferimento, hanno un coefficiente di assorbimento della radiazione solare di α = 0,8, invece, i parametri delle superfici trasparenti sono stati assimilati a quelli di un vetro singolo chiaro.

Nella tabella seguente (Tab. 9) si riportano i parametri principali di ciascun componente, numerati con riferimento alla Fig. 47. Per conoscere nel dettaglio le caratteristiche e la composizione degli elementi del modello, consultare l'appendice della tesi.

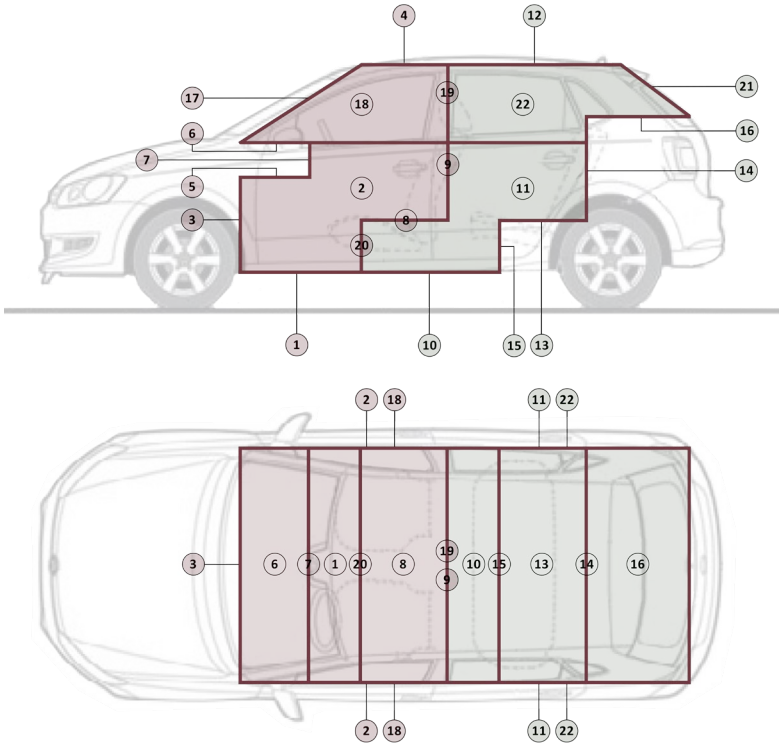


Fig. 47 Numerazione degli elementi del modello in prospetto e in pianta:

(1) pianale anteriore;
(2) portiere anteriore;
(3) fronte;
(4) cielo anteriore;
(5) cruscotto inferiore;
(6) cruscotto superiore;
(7) cruscotto verticale;
(8) sedile anteriore;
(9) schienale anteriore;
(10) pianale posteriore;
(11) portiere posteriori;
(12) cielo posteriore;
(13) sedile posteriore;
(14) schienale posteriore;
(15) sotto sedile;
(16) copri-bagagliaio;
(17) parabrezza;
(18) finestrini anteriore;
(19) apertura superiore;
(20) apertura inferiore;
(21) lunotto;
(22) finestrini posteriore.

N.	**Componenti opachi Z1**	**Tipo**	**Superficie (S)**	**Trasmittanza termica (U)**	**Resistenza termica (R)**	**Spessore (s)**
1	Pianale	Opaco	0,95 m^2	1,57 W/m^2K	0,43 m^2K/W	22 mm
2	Portiere (n.2)	Opaco	1,34 m^2	2,75 W/m^2K	0,19 m^2K/W	46 mm
3	Fronte	Opaco	0,74 m^2	2,34 W/m^2K	0,26 m^2K/W	12 mm
4	Cielo	Opaco	0,68 m^2	1,80 W/m^2K	0,42 m^2K/W	19 mm
5	Cruscotto inferiore	Adiabatico	0,54 m^2	2,52 W/m^2K	0,26 m^2K/W	12 mm
6	Cruscotto superiore	Adiabatico	0,54 m^2	2,14 W/m^2K	0,26 m^2K/W	12 mm
7	Cruscotto verticale	Adiabatico	0,27 m^2	2,34 W/m^2K	0,26 m^2K/W	12 mm
8	Sedile	Opaco	0,68 m^2	0,46 W/m^2K	1,82 m^2K/W	73 mm
9	Schienale	Opaco	0,74 m^2	0,48 W/m^2K	1,82 m^2K/W	73 mm
N.	**Componenti opachi Z2**	**Tipo**	**Superficie (S)**	**Trasmittanza termica (U)**	**Resistenza termica (R)**	**Spessore(s)**
10	Pianale	Opaco	1,08 m^2	1,57 W/m^2K	0,43 m^2K/W	22 mm
11	Portiere (n.2)	Opaco	1,20 m^2	2,75 W/m^2K	0,19 m^2K/W	46 mm
12	Cielo	Opaco	1,35 m^2	1,80 W/m^2K	0,42 m^2K/W	19 mm
13	Sedile	Adiabatico	0,68 m^2	0,49 W/m^2K	1,82 m^2K/W	73 mm
14	Schienale	Adiabatico	0,81 m^2	0,50 W/m^2K	1,82 m^2K/W	73 mm
15	Sotto sedile	Adiabatico	0,41 m^2	1,67 W/m^2K	0,43 m^2K/W	22 mm
16	Copri-bagagliaio	Adiabatico	0,81 m^2	4,55 W/m^2K	0,01 m^2K/W	2 mm
N.	**Componenti trasparenti Z1**	**Tipo**	**Superficie (S)**	**Trasmittanza termica (U_w)**	**Fattore solare (g)**	**Emissività (ε)**
17	Parabrezza	Trasparente	1,12 m^2	5,00 W/m^2K	0,75	0,84
18	Finestrini (n.2)	Trasparente	0,77 m^2	5,00 W/m^2K	0,75	0,84
19	Apertura superiore	Apertura	0,47 m^2	-	-	-
20	Apertura inferiore	Apertura	0,41 m^2	-	-	-
N.	**Componenti trasparenti Z2**	**Tipo**	**Superficie (S)**	**Trasmittanza termica (U_w)**	**Fattore solare (g)**	**Emissività (ε)**
21	Lunotto	Trasparente	0,68 m^2	5,00 W/m^2K	0,75	0,84
22	Finestrini (n.2)	Trasparente	0,96 m^2	5,00 W/m^2K	0,75	0,84

Tabella 9 Parametri termici degli elementi del modello.

Integrazione del prototipo nel modello

Dopo aver eseguito la simulazione allo stato di fatto, sono stati ipotizzati tre scenari differenti integrando nel modello i prototipi NBT1 e NBT2 con tre tipologie di paraffine a diverse temperature di fusione. Le paraffine utilizzate sono la RT 35HC, la RT 42 e la RT 44HC. Il codice HC indica una maggiore capacità di accumulo di calore latente rispetto alle paraffine standard, come quella impiegata in laboratorio nella realizzazione dei campioni.

I prototipi NBT sono stati inseriti nella struttura delle portiere, nei sedili, nel cruscotto e nel cielo dell'auto, sostituendo, laddove presenti, i materiali isolanti. Nelle portiere (comp. 2-11) si è ipotizzato di inserire i prototipi NBT nella cavità tra le due lamiere. Nei sedili (comp. 8-9 e 13-14) è stata sostituita una porzione di imbottitura in schiuma di poliuretano pari allo spessore dei campioni, mentre nel cielo (comp. 4-12) e nel cruscotto (comp. 6) è stato sostituito lo strato isolante in feltro.

Le sezioni sottostanti (Fig. 48) illustrano le stratigrafie degli elementi, prima e dopo l'integrazione con il prototipo NBT, evidenziato in colore rosso.

I valori di densità (ρ), conducibilità termica (λ) e calore specifico (cp) dei vari prototipi sono stati calcolati facendo una media pesata sulle percentuali volumiche di ciascun materiale presente all'interno del prototipo. Per gli scenari S1 e S2, alla matrice poliuretanica sottovuoto ($\rho = 50$ kg/m^3) è stata aggiunta paraffina RT 35HC, in due percentuali diverse, con $\rho = 770$ kg/m^3. Gli scenari S3 e S4 hanno valutato l'impiego di paraffina RT 42 con una $\rho = 760$ kg/m^3, mentre gli scenari S5 e S6, paraffina RT 44HC con una densità pari a $\rho = 700$ kg/m^3.

Le conducibilità termiche e i calori specifici finali risultano uguali per i prototipi contenenti gli stessi quantitativi di paraffina, in quanto i valori di λ e di cp non variano tra un PCM e l'altro. La conducibilità termica della paraffina è $\lambda = 0{,}2$ W/mK e cp = 2000 J/kgK. La matrice poliuretanica di partenza (prototipo NBT0) ha un valore di $\lambda = 0{,}037$ W/mK, ottenuto dalla misurazione dell'*Heat Flow Meter*.

La tabella 10 riporta le caratteristiche dei vari campioni utilizzati nei sei scenari ipotizzati:

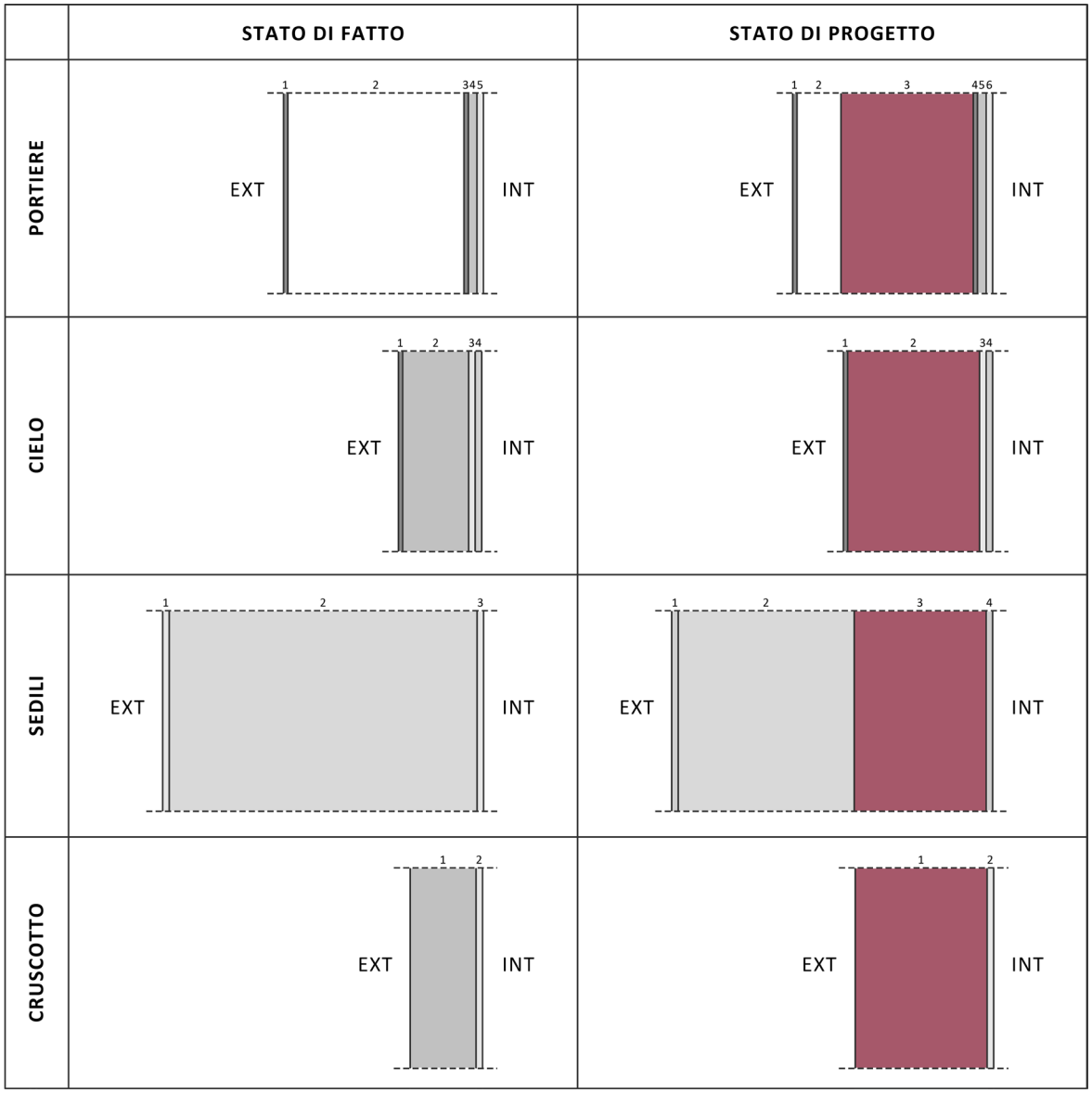


Fig. 48 Stratigrafie dello stato di fatto e di progetto dei componenti in cui è stato aggiunto il prototipo NBT.

Scenario	**Prototipo**	**PCM**	**% in vol di PCM**	**Densità (ρ)**	**Conducibilità termica (λ)**	**Calore specifico (cp)**
S_1	NBT1	RT 35 HC	25 % in vol	242,5 kg/m^3	0,087 W/mK	1720 J/kgK
S_2	NBT2	RT 35 HC	50 % in vol	435 kg/m^3	0,137 W/mK	1970 J/kgK
S_3	NBT1	RT 42	25 % in vol	240 kg/m^3	0,087 W/mK	1720 J/kgK
S_4	NBT2	RT 42	50 % in vol	430 kg/m^3	0,137 W/mK	1970 J/kgK
S_5	NBT1	RT 44 HC	25 % in vol	225 kg/m^3	0,087 W/mK	1720 J/kgK
S_6	NBT2	RT 44 HC	50 % in vol	400 kg/m^3	0,137 W/mK	1970 J/kgK

Tabella 10 Caratteristiche dei prototipi utilizzati come integrazione allo stato di fatto nei 6 scenari di progetto.

Questi valori sono stati inseriti nel software per ricreare i prototipi. Dalla misurazione della conducibilità termica del prototipo NBT1 realizzato con il 25% in volume di paraffina RT 35, è stato determinato un valore di λ = 0,059 W/mK, differente da quello inserito nel software di modellazione. I risultati ottenuti da una simulazione con il valore di conducibilità effettivo hanno registrato variazioni minime, dell'ordine di 0,2 °C.

Ogni paraffina, avente una propria curva di entalpia (h), è stata ricreata nel modello inserendone i valori progressivi, calcolando la media tra l'h di fusione e l'h di congelamento per ogni grado di temperatura. La capacità di accumulo di calore complessivo delle paraffine utilizzate nel modello è differente: la RT 35HC ha un'entalpia dichiarata dalla scheda tecnica pari a h = 240 kJ/kg, la RT 42 ha una h = 165 kJ/kg e la paraffina RT 44HC ha una h = 250 kJ/kg. Le tre immagini seguenti illustrano le entalpie progressive in funzione della temperatura, inserite nel software (Fig. 49). Le schede tecniche relative alle paraffine utilizzate sono visionabili nell'appendice della tesi.

Per quanto riguarda l'entalpia misurata attraverso l'*Heat Flow Meter* del prototipo NBT1 con la paraffina RT 35, i valori ottenuti hanno dimostrato una diminuzione rispetto a quelli dichiarati dall'azienda. Nel software di modellazione sono stati inseriti i valori dichiarati, poiché non è stato possibile effettuare una misurazione diretta per ogni prototipo, contenenti le tre tipologie di paraffina.

A titolo di esempio, nella Tab. 11 si riportano le caratteristiche geometriche e termiche dei componenti del modello integrati con il prototipo nello scenario $S_{1.}$

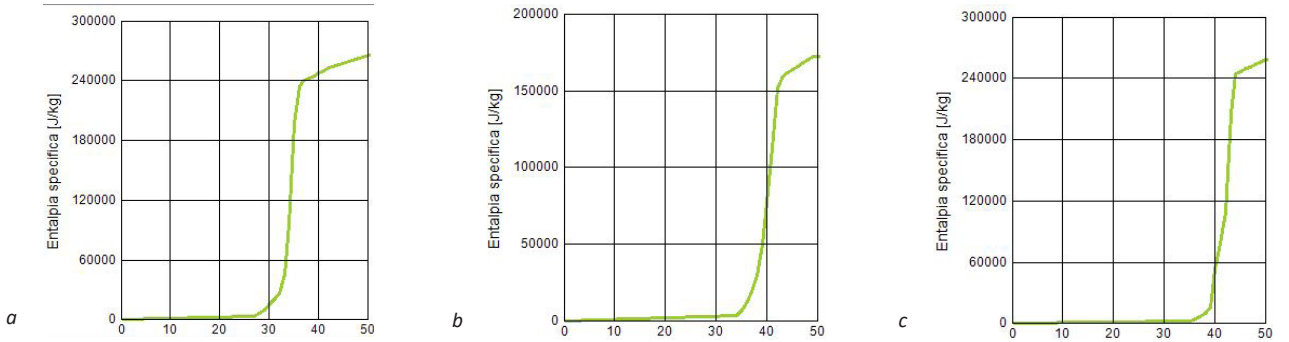


Fig. 49 Grafici delle entalpie in funzione della temperatura delle paraffine: a) RT 35HC, b) RT 42, c) RT 44HC.

N.	**Componenti opachi Z1**	**Tipo**	**Superficie (S)**	**Trasmittanza termica (U)**	**Resistenza termica (R)**	**Spessore (s)**
2	Portiere (n.2)	Opaco	1,34 m^2	1,48 W/m²K	0,51 m²K/W	46 mm
4	Cielo	Opaco	0,68 m^2	1,90 W/m²K	0,39 m²K/W	34 mm
6	Cruscotto superiore	Adiabatico	0,54 m^2	1,78 W/m²K	0,35 m²K/W	32 mm
8	Sedile	Opaco	0,68 m^2	0,57 W/m²K	1,41 m²K/W	73 mm
9	Schienale	Opaco	0,74 m^2	0,60 W/m²K	1,41 m²K/W	73 mm
N.	**Componenti opachi Z2**	**Tipo**	**Superficie (S)**	**Trasmittanza termica (U)**	**Resistenza termica (R)**	**Spessore (s)**
11	Portiere (n.2)	Opaco	1,20 m^2	1,48 W/m²K	0,51 m²K/W	46 mm
12	Cielo	Opaco	1,35 m^2	1,90 W/m²K	0,39 m²K/W	34 mm
13	Sedile	Adiabatico	0,68 m^2	0,62 W/m²K	1,41 m²K/W	73 mm
14	Schienale	Adiabatico	0,81 m^2	0,63 W/m²K	1,41 m²K/W	73 mm

Tabella 11 Caratteristiche dei componenti del modello integrati con il prototipo nello scenario $S_{1.}$

6.3 I risultati

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti dalle analisi del modello di simulazione dinamica allo stato di fatto e dei vari modelli integrati con il prototipo, confrontati con l'ambiente esterno. I parametri climatici utilizzati nei vari modelli non sono stati variati, per confrontare i risultati ottenuti.

6.3.1 Simulazione dinamica dell'abitacolo allo stato di fatto

Attraverso il report generato dal software, si possono analizzare le variazioni di temperatura esterna (T_e) nel periodo di analisi. Come dimostrato dal grafico nella Fig. 50, nel giorno 23 luglio alle ore 11:00, si registra il valore di temperatura esterna massima ($T_{e,max}$ = 34,5 °C) e nel giorno 18 settembre alle ore 08:00 il valore di temperatura minima ($T_{e,min}$ = 12,7 °C). La temperatura media estiva equivale a $T_{e,med}$ = 23,4 °C.

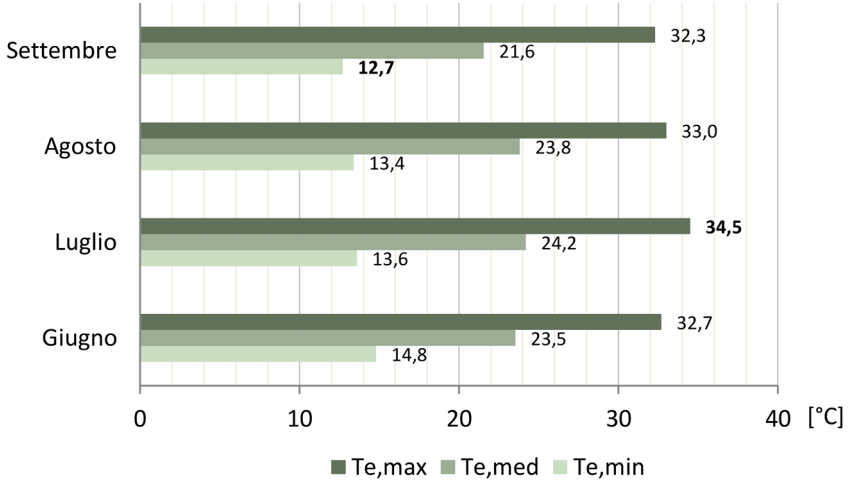


Fig. 50 Grafico delle temperature esterne massime, medie e minime nei mesi estivi registrate a Torino.

WUFI® Plus ha inoltre calcolato per ogni ora, in funzione delle condizioni esterne, le temperature dell'aria generate all'interno delle due zone climatiche del modello (Z1 e Z2). Dal report si riscontra che all'interno

dell'abitacolo si raggiungono temperature ampiamente superiori rispetto al clima esterno, con picchi anche di 60 °C durante le ore centrali della giornata.

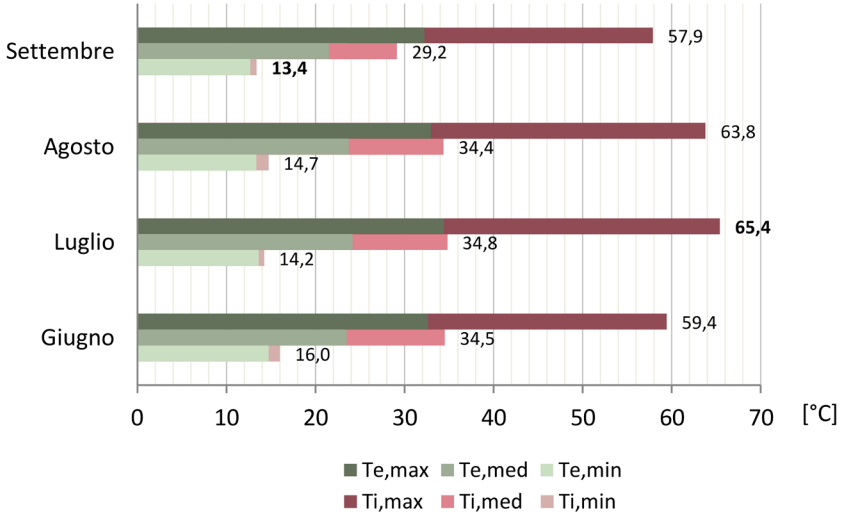


Fig. 51 Grafico di confronto tra le temperature Tmax, Tmed e Tmin delle temperature esterne e interne nei mesi estivi.

Nel modello si è riscontrata una lieve differenza di temperature tra le due zone termiche. La Z1 ha temperature di poco superiori rispetto alla Z2 e per questo sarà presa in esame per confrontare i vari scenari di progetto. Le temperature interne massima e minima registrate nell'auto sono rispettivamente $T_{i,max}$ = 65,4 °C nel giorno 19 luglio alle ore 12:00 e $T_{i,min}$ = 13,4 °C nel giorno 18 settembre alle ore 6:00. In mancanza di una misurazione diretta, i risultati sono stati ritenuti plausibili perché in accordo con analisi simili effettuate da Jamekhorshid e Sadrameli,[55] Mezrhab e Bouzidi,[56] Dadour et al.,[57] Cabeza et al.[58]

Il grafico in alto (Fig. 51) mette a confronto le temperature massime, medie e minime registrate nell'abitacolo con le temperature esterne durante i mesi estivi. Si può notare che le temperature massime nell'auto sono

55 A. Jamekhorshid, S. M. Sadrameli, *Application of Phase Change Materials (PCMs) in Maintaining Comfort temperature inside an Automobile,* World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Chemical and Molecular Engineering, vol. 6 n.1 (2012), pp. 1-3.

56 A. Mezrhab, M. Bouzidi, *Computation of thermal comfort inside a passenger car compartment*, Applied Thermal Engineering, vol. 26, n. 14-15 (2006), pp. 1697-1704.

57 I. R. Dadour, I. Almanjahie, N. D. Fowkes, G.Keady, K. Vijayan, *Temperature variations in a parked vehicle*, Forensic Science International, vol. 207, n. 1–3 (2011), pp. 205-211.

58 E. Oró, E. de Jong, L. F. Cabeza, *Experimental analysis of a car incorporating phase change material*, Journal of Energy Storage, vol. 7 (2016), pp. 131-135.

nettamente superiori alle massime esterne, mentre le temperature minime si discostano leggermente. Questo andamento è dovuto al fatto che, durante il giorno, gli elevati apporti solari surriscaldano rapidamente l'ambiente interno, mentre di notte, grazie alle caratteristiche disperdenti delle superfici e alla mancanza dell'irraggiamento solare, la temperatura all'interno dell'automobile si conforma alla temperatura esterna.

Analizzando nello specifico l'andamento complessivo delle temperature, il 22 luglio è stato selezionato come uno dei giorni che mostrava un andamento più uniforme, ossia privo di picchi. È anche uno dei giorni in cui si registrano le temperature diurne più alte ($T_{e,max,22/7}$ = 33,9 °C).

Dal grafico nella Fig. 52 si può notare come la temperatura interna inizi a crescere rapidamente fin dalle prime

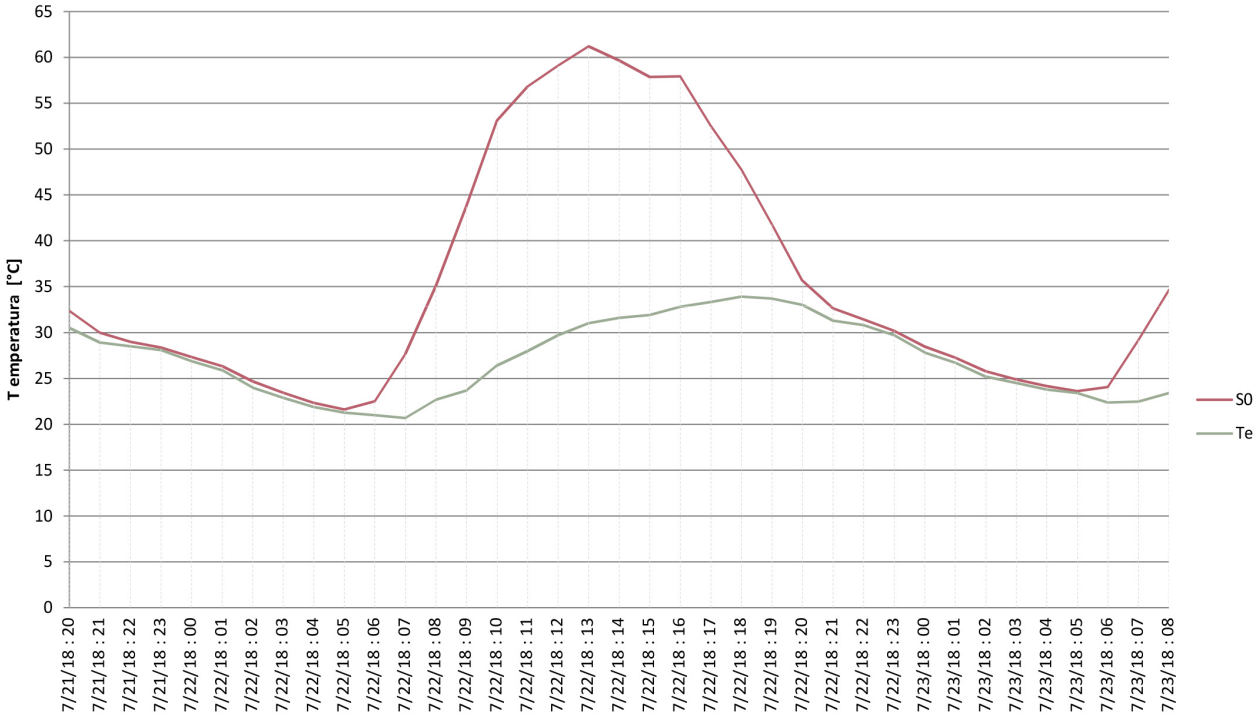


Fig. 52 Grafico di confronto tra le temperature esterne (T_e) e interne (S_0) nel giorno 22 luglio.

ore del mattino, in particolare dalle ore 7:00 in cui si registra un innalzamento di circa 7 °C rispetto all'esterno. La curva T_i cresce in modo quasi costante fino al raggiungimento della $T_{i,max}$ pari a 61,2 °C alle ore 13:00, in cui si registra anche il valore massimo giornaliero di irraggiamento solare (I_{max} = 843 W/m^2). Dopo le ore 13:00 la T_i decresce fino ad uniformarsi alla T_e. Dalle ore 21:00 fino al mattino seguente, i valori di T_i e T_e sono pressoché coincidenti. Dall'andamento delle temperature si evince che il picco massimo di T_i e di T_e non corrispondono allo stesso momento della giornata: $T_{i,max}$, infatti, anticipa $T_{e,max}$ di 5 ore.

6.3.2 Simulazione dinamica dell'abitacolo con l'integrazione del prototipo

Lo studio delle temperature generate all'interno del veicolo con l'integrazione del prototipo è stato effettuato mediante sei scenari. I prototipi NBT inseriti nel modello contengono tre paraffine a temperatura di fusione diverse, nelle quantità di 25% in volume e di 50% in volume.

Si è scelto di confrontare gli scenari contenenti lo stesso quantitativo di PCM, ma a differenti temperature di fusione. In questo modo sarà possibile vedere il comportamento del prototipo, durante una giornata tipo, con il 25% in volume di paraffina (scenari S_1, S_3 e S_5) e con il 50% in volume (scenari S_2, S_4 e S_6). Tutti gli scenari saranno poi messi in relazione attraverso un grafico di frequenze cumulate che permetterà di evincere la soluzione più efficiente.

Analizzando l'andamento delle temperature negli scenari S_1, S_3 e S_5, con la temperatura interna nello stato di fatto e con la temperatura esterna, si può riscontrare il diverso comportamento delle paraffine inserite nei prototipi. Lo scenario S_1 contiene il prototipo NBT1 con la paraffina RT 35HC, lo scenario S_3 contiene la paraffina RT 42 e lo scenario Sè la paraffina RT 44HC.

Dal grafico nella Fig. 53 si evince, in modo immediato, che le temperature interne durante le ore diurne siano inferiori rispetto allo stato di fatto, mentre nelle ore notturne le temperature siano superiori. Questi risultati sono conformi alle ipotesi iniziali basate sul comportamento del PCM. Quest'ultimo, infatti, grazie alle sue proprietà di accumulo termico, durante il giorno riesce ad assorbire una parte del calore presente all'interno del veicolo, abbassandone la temperatura, per poi rilasciarlo nel tardo pomeriggio e durante la notte.

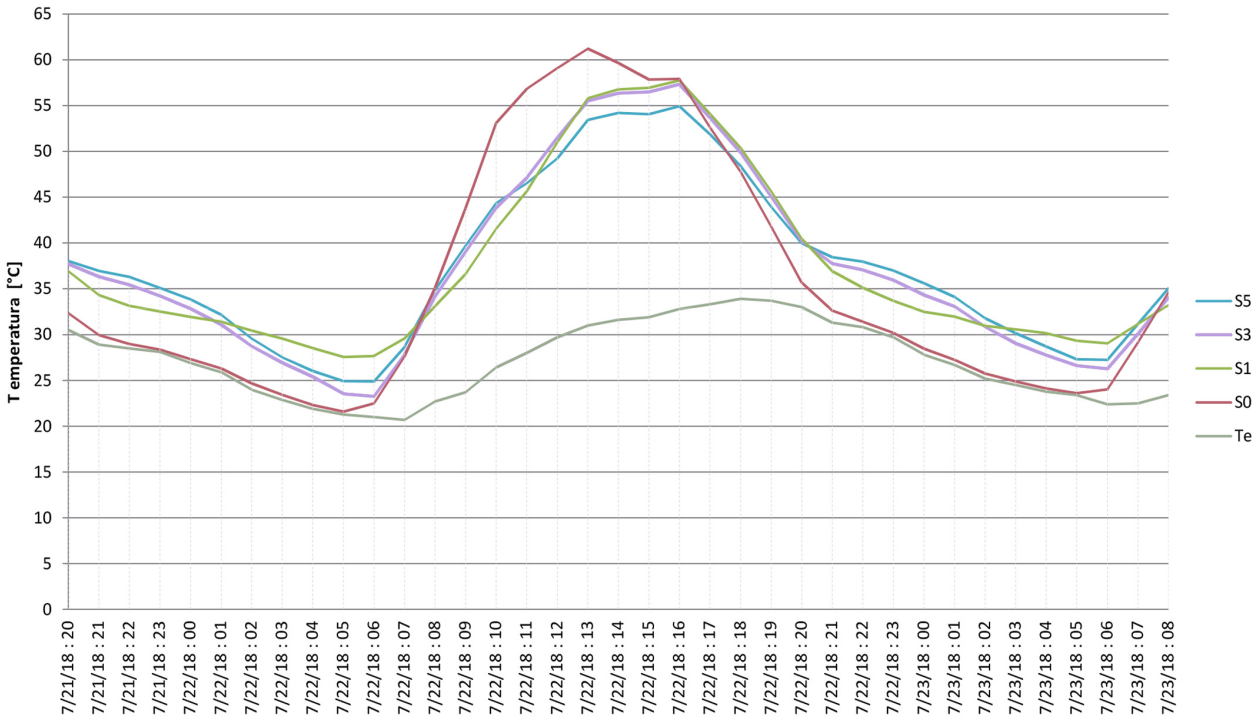


Fig. 53 Grafico di confronto delle temperature interne nello scenario S_1 (Scenario 1), S_3 (Scenario 3), S_5 (Scenario 5).

In tutti e tre gli scenari, i PCM si attivano tra le ore 7:00 e le ore 8:00, ossia quando le T_i iniziano a superare i 30 °C, mantenendo una temperatura inferiore rispetto allo stato di fatto (S_0) fino alle ore 16:00-17:00. Si può affermare dunque, che il PCM riesca ad assorbire calore per 9 ore consecutive durante la giornata.

Più in particolare, dalle ore 7:00 alle ore 11:00, negli scenari S_3 e S_5, le temperature misurate sono pressoché uguali, a differenza dello S_1 nel quale la paraffina RT 35HC riesce ad assorbire più calore. In questa fascia oraria, le T_i nello stato di fatto variano dai 27 °C ai 57 °C, corrispondenti al range di operatività dell'RT 35HC, la quale ha bisogno di alcune ore di esposizione a temperature superiori ai 50 °C per fondere completamente. Dalle ore 12:00 alle ore 16:00, invece, le curve di S_1 e S_3 diventano coincidenti mentre la curva di S_5 si abbassa ulteriormente

registrando temperature interne inferiori. Analogamente alla paraffina in S1, la RT 44HC assorbe più calore in queste ore rispetto alle altre paraffine, perché ha un range di operatività traslato su temperature maggiori.

Alle ore 16:00 si rilevano, per tutti gli scenari di progetto, le Ti,max: in S1 e S3 sono pressoché uguali, di circa 57 °C, mentre in S5 la temperatura massima corrisponde a 54,9 °C. In questo momento della giornata, la T interna nello stato di fatto ha già iniziato a decrescere.

Fino al mattino seguente (ore 6:00) le temperature interne calano, restando superiori rispetto allo scenario S0. Questo è dovuto al fatto che, il PCM, raggiunto la capacità massima di assorbimento, inizia a rilasciare calore.

Gli abbassamenti di temperatura maggiori si verificano durante la prima parte della giornata, quando il PCM è in grado di accumulare più calore, essendo nella fase iniziale di fusione. I valori massimi riscontrati sono:

- $\Delta T_{max,S1}$ = - 11,5 °C alle ore 10:00;
- $\Delta T_{max,S3}$ = - 9,7 °C alle ore 11:00;
- $\Delta T_{max,S5}$ = - 10,3°C alle ore 11:00.

Il grafico seguente (Fig. 54) mostra l'andamento delle temperature riscontrate negli scenari S_2, S_4 e S_6 e le temperature in S_0 e nell'ambiente esterno nel giorno 22 luglio. Le curve mostrano un andamento simile a quelle nella Fig. 53, ma con differenti diminuzioni e crescite di temperatura. Durante il giorno, infatti, le temperature riscontrate negli scenari di progetto S_2, S_4 e S_6 sono inferiori rispetto agli scenari S_1, S_3 e S_5 analizzati precedentemente, e questo è dovuto alla presenza di PCM in maggiori quantità. I prototipi NBT2 utilizzati in questi scenari hanno una quantità doppia di paraffina rispetto agli scenari precedenti e per questo motivo sono in grado di accumulare più calore. Per la stessa ragione, durante la notte, le temperature interne sono più elevate rispetto agli scenari con i campioni NBT1. L'aumento di temperatura riscontrato non è però proporzionale alla quantità di paraffina aggiunta nel prototipo.

Un'altra differenza rispetto agli scenari precedenti è l'estensione delle ore di operatività del sistema durante il giorno. Dal grafico si nota, infatti, che gli scenari di progetto intersecano la curva di S_0 più tardi. In particolare,

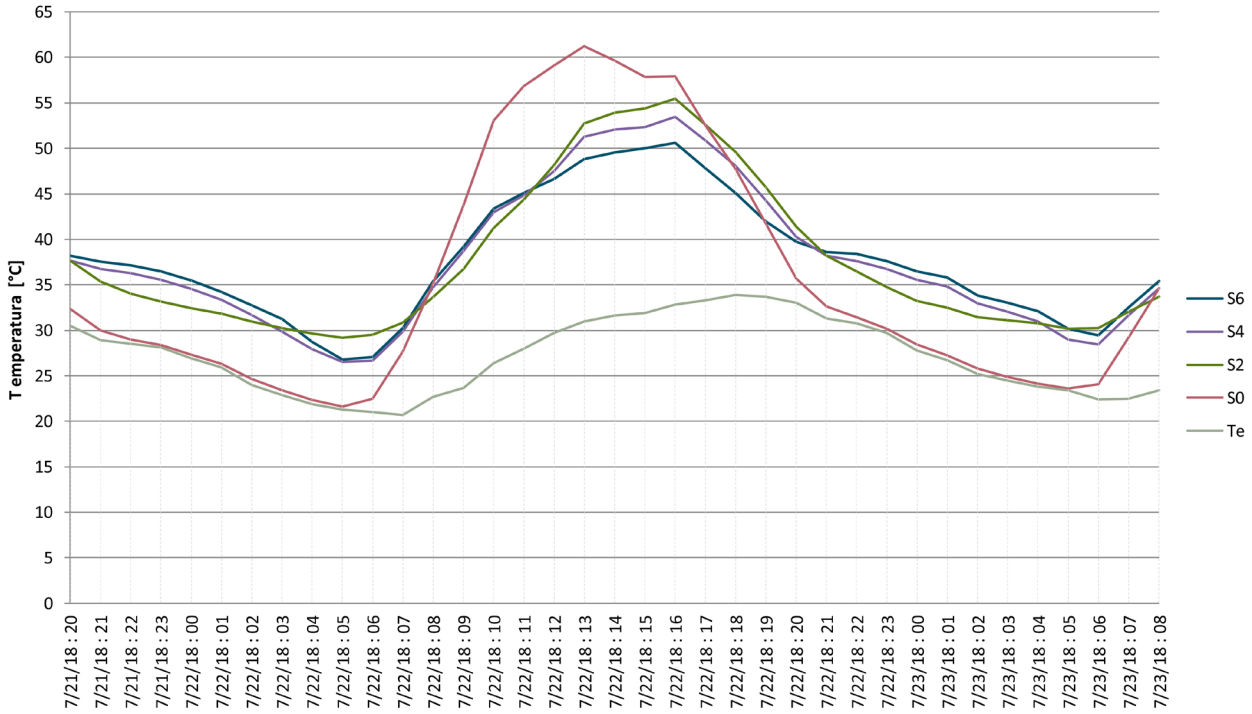


Fig. 54 Grafico di confronto delle temperature interne nello scenario S_2 (Scenario 2), S_4 (Scenario 4), S_6 (Scenario 6).

nello scenario S_2 il campione riesce a mantenere una temperatura inferiore rispetto allo stato di fatto fino alle ore 17:00, nello scenario S_4 fino alle ore 18:00 circa e nello scenario S_6 fino alle 19:00. L'ammontare totale di ore di operatività passa quindi dalle 9 ore dei casi precedenti a 9 ore, 10 ore e 11 ore rispettivamente.

Un'altra considerazione che si può fare mettendo a confronto il comportamento dei prototipi NBT1 e NBT2 è che gli scenari S_2, S_4 e S_6 manifestano una differenza di circa 2° C alle massime temperature. Le temperature interne massime, registrate alle ore 16:00, sono pari a:

- $T_{max,S2}$ = 55,4 °C;
- $T_{max,S4}$ = 53,5 °C;

- $T_{max,S6}$ = 50,6 °C.

Gli abbassamenti massimi di temperatura dei tre scenari rispetto alla temperatura interna dello stato di fatto sono invece pari a:

- $\Delta T_{max,S2}$ = - 12,5 °C alle ore 11:00;
- $\Delta T_{max,S4}$ = - 12,0 °C alle ore 11:00;
- $\Delta T_{max,S6}$ = - 12,5 °C alle ore 12:00.

Considerando l'intero periodo estivo, si è notato che il software ha calcolato, nella giornata del 4 luglio alle ore 11:00 il maggior abbassamento di temperatura, per gli scenari S_1 e S_2, contenenti la paraffina RT 35HC. I rispettivi valori sono:

- $\Delta T_{max,estate,S1}$ = - 16,3 °C;
- $\Delta T_{max,estate,S2}$ = - 20,0 °C.

Il paragrafo successivo tratterà gli esiti ottenuti dalle simulazioni confrontandoli attraverso il diagramma delle frequenze cumulate delle temperature interne. Per individuare lo scenario migliore tra quelli proposti, si effettueranno valutazioni anche su altri aspetti, valutandone i relativi vantaggi e svantaggi.

6.4 Discussione dei risultati

Attraverso l'analisi delle frequenze cumulate delle temperature registrate sull'intera stagione estiva nei sei scenari di progetto, si può valutare l'efficienza di ciascuno di essi sotto l'aspetto termico. Lo scenario preferibile è rappresentato dalla curva che ha l'andamento più ripido, ossia che registra temperature inferiori per più tempo rispetto agli altri scenari. La rappresentazione delle frequenze cumulate è riportata nel grafico seguente (Fig. 55).

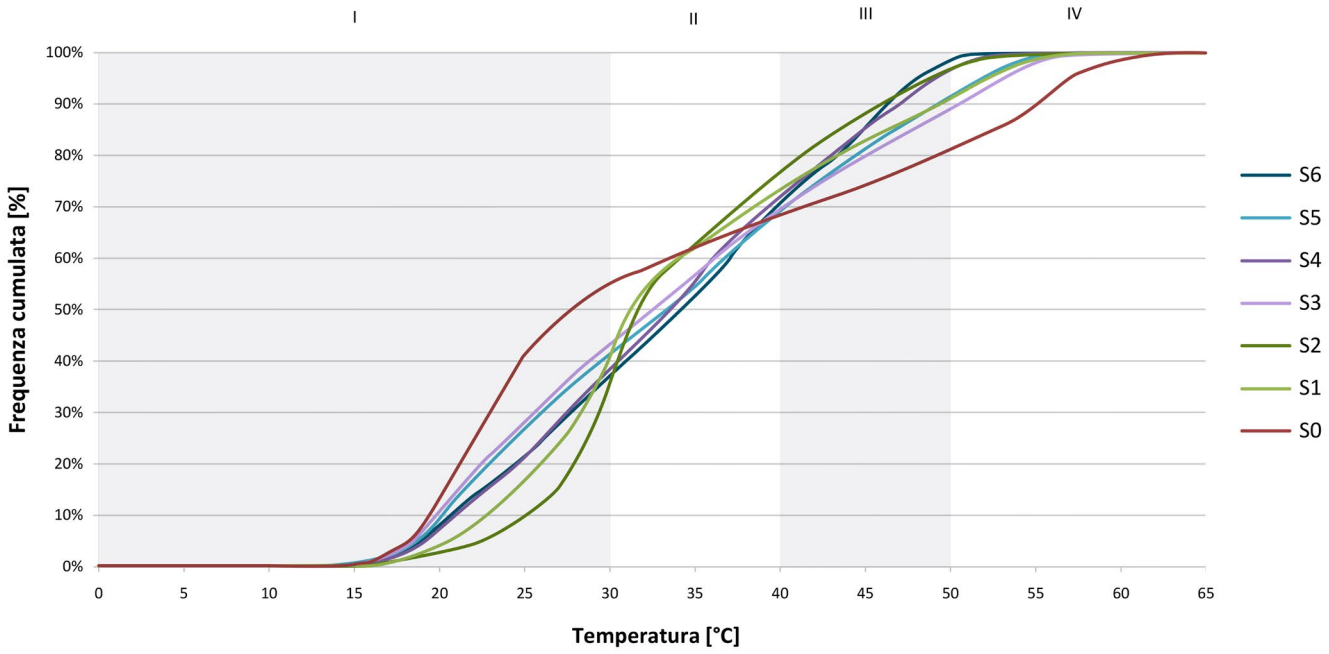


Fig. 55 Grafico delle frequenze cumulate degli scenari S0, S1, S2, S3, S4, S5, S6.

Per semplificare la lettura, l'asse X, riportante le temperature interne, è stato diviso in quattro settori: il settore I comprende le T_i da 0 °C a 30 °C, il settore II da 31 °C a 40 °C, il settore III da 41°C a 50 °C, e infine il settore IV da 51 °C a 65 °C. La curva di colore rosso rappresenta lo scenario dello stato di fatto S_0, da utilizzare come riferimento.

Nel settore I, la curva che registra la frequenza cumulata più alta è lo stato di fatto, con un valore del 55%. Nel veicolo, infatti, le temperature inferiori ai 30 °C si registrano perlopiù durante le ore notturne. Come dimostrato dai grafici nel paragrafo precedente, in questo intervallo di tempo tutti gli scenari di progetto hanno temperature superiori allo stato di fatto, poiché il PCM rilascia il calore assorbito durante il giorno. Questo è il motivo per cui, in questo settore, essi hanno frequenze cumulate inferiori rispetto a S_0. La situazione si inverte nel settore II, tra i 35 °C e i 40 °C, quando tutte le curve di progetto intersecano e superano la curva dello stato di fatto.

I settori che più interessano questa analisi, sono il settore II e III, che comprendono l'intervallo di temperature tra i 31 °C e i 50 °C, poiché corrispondono ai range di operatività nella fase fusa dei PCM studiati negli scenari.

Nel settore II, la curva S_2 dimostra un andamento migliore rispetto a tutti gli altri scenari, raggiungendo il valore massimo di frequenza cumulata del 76%. Ciò significa che, per il 76% del tempo, all'interno del veicolo le temperature sono inferiori ai 40°C. A seguire troviamo la curva S_1 con il valore 73%. Gli altri scenari raggiungono frequenze cumulate simili tra loro, con un valore medio del 70% a fronte del 68% riscontrato nello stato di fatto.

Nel settore III e IV, i vantaggi termici che i prototipi generano nel veicolo, rispetto allo stato di fatto, sono ben visibili. Le curve di progetto, infatti, si discostano da S0 al crescere delle temperature, raggiungendo un guadagno quasi del 20% alla temperatura di 50 °C.

Dal grafico delle frequenze cumulate, è possibile ricavare le frequenze di temperatura divise per settori, per ciascuno scenario (Tab. 12). In questo modo è possibile fare dei confronti diretti tra i valori ottenuti per scegliere lo scenario più efficiente dal punto di vista termico.

Partendo dal settore IV, ovvero il campo delle temperature più elevate, i prototipi inseriti negli scenari S_2, S_4 e S_6 risultano più efficienti in quanto riducono la frequenza delle temperature al di sopra dei 50 °C, dal 19% in S_0 al 3%, 3% e 1% rispettivamente. Tali scenari corrispondono ai casi in cui sono stati inseriti i prototipi NBT2, contenenti maggiore quantità di PCM. Tra questi tre scenari, nel range di temperatura tra i 41 °C e i 50 °C (settore III), S_2 registra la frequenza più bassa, pari al 21%, contro il 26% di S4 e il 28% di S_6. Continuando a valutare le frequenze di S_2, S_4 e S_6 per settore, si vede come nel settore II lo scenario S_2 registra la frequenza maggiore (40%).

Settori	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6
I	55%	40%	**36%**	43%	38%	41%	37%
II	14%	33%	**40%**	27%	33%	28%	34%
III	12%	18%	**21%**	19%	26%	22%	28%
IV	19%	9%	**3%**	11%	3%	9%	1%

Tabella 12 Frequenze per settore degli scenari S0, S1, S2, S3, S4, S5, S6.

Dopo queste valutazioni, lo **scenario S2**, contenente il prototipo NBT2 con la paraffina RT 35HC al 50% in volume, è la soluzione più efficiente dal punto di vista termico perché registra l'abbassamento maggiore di frequenze delle alte temperature.

Gli scenari di progetto possono essere valutati sotto altri aspetti, per determinare nuovi vantaggi e/o svantaggi che la sola analisi termica non prenderebbe in considerazione. Per esempio, l'influenza dei prototipi sul peso totale del veicolo. Uno degli obiettivi che ci siamo prefissati con lo sviluppo di questa tesi, oltre al miglioramento del comfort termico nei veicoli durante il periodo estivo, è la diminuzione dei consumi generati dalla climatizzazione delle auto. I consumi dei veicoli, però, sono anche legati al loro peso. Per questo motivo, si è calcolato il peso che i prototipi NBT1 (25% in vol di PCM) e NBT2 (50% in vol di PCM) apportano al veicolo.

Si è deciso di riportare i dati relativi alla paraffina RT 35HC, selezionata in base alle considerazioni precedenti. Ricordando che, il prototipo NBT1 allo scenario S_1, ha una densità ρ = 242,5 kg/m^3 e il prototipo NBT2 allo scenario S_2 ha una densità ρ = 435 kg/m^3 e conoscendo le superfici in cui sono applicati, è possibile calcolare la massa aggiunta.

La tabella 13 riporta i calcoli della massa per il prototipo NBT1 nello scenario S1:

Elementi	Spessore	Superficie	Volume	Massa NBT1	Massa effettiva
Sedili	0,03 m	2,91 m^2	0,087 m^3	21,17 kg	18,11 kg
Portiere	0,03 m	2,54 m^2	0,076 m^3	18,48 kg	18,48 kg
Cielo	0,03 m	2,03 m^2	0,061 m^3	14,77 kg	12,64 kg
Cruscotto	0,03 m	0,54 m^2	0,016 m^3	3,93 kg	3,55 kg
				58,35 kg	**52,78 kg**

Tabella 13 Calcolo della massa aggiunta al veicolo nello scenario S1.

La massa NBT1 fa riferimento alla quantità di materiale aggiunto attraverso il prototipo NBT1, mentre la massa effettiva tiene conto dei materiali isolanti che sono stati sostituiti dal prototipo (feltri isolanti e schiume PUR). Dalla tabella 13 si ricava che la massa totale aggiunta al veicolo nello scenario S_1 è pari a 58,35 kg e la massa totale effettiva ammonta a 52,78 kg. Nello scenario S_2, la massa aggiunta al veicolo ammonterebbe a quasi 105 kg, causata dall'elevata densità del prototipo NBT2. Questo influenzerebbe troppo il peso del veicolo e, di conseguenza, si perderebbero i vantaggi legati all'applicazione di questo prototipo.

Data l'ipotesi di inserire il prototipo anche nei sedili e negli schienali, sarà importante valutare anche l'aspetto ergonomico delle sedute. La paraffina, quando è allo stato solido, rende la matrice poliuretanica molto compatta, perciò sarebbe necessario prevedere un layer aggiuntivo che funga da imbottitura esterna.

A fronte delle considerazioni effettuate finora, i prototipi contenenti la paraffina RT 35HC sono risultati migliori sotto l'aspetto termico. Sarebbe erroneo considerare questo come unico fattore, poiché anche il peso e l'ergonomia del prototipo hanno una loro importanza. Si è deciso dunque, di mediare questi aspetti e scegliere come soluzione preferibile, tra il prototipo NBT2 in S_2 e NBT1 in S_1, il prototipo NBT1 nello **scenario S_1**.

7

VALUTAZIONE DELL' ECOCOMPATIBILITÀ DEL PROTOTIPO

7.1 Life Cycle Assessment (LCA)

Il *Life Cycle Assessment* o valutazione del ciclo di vita è uno dei metodi o strumenti di analisi dell'impatto ambientale relativo all'intero ciclo di vita di un prodotto, attività o processo.

Per analisi dell'impatto ambientale s'intende una quantificazione oggettiva degli input necessari alla realizzazione di un prodotto/attività/processo, in termini di energia consumata e materie prime utilizzate, e degli output rilasciati in ambiente attraverso le emissioni in aria, acqua e suolo. Alla quantificazione numerica si aggiunge la valutazione delle esternalità sull'ambiente dovute ai processi produttivi.

La valutazione dell'intero ciclo di vita di un prodotto "dalla culla alla tomba" parte dalle prime fasi di estrazione e trattamento delle materie prime, prosegue con la fabbricazione, il trasporto e il consumo, per poi terminare con i processi di riuso, riciclo e/o smaltimento, il tutto all'interno di un contesto attuativo ben definito.

Il metodo LCA nasce dall'esigenza di regolare lo sfruttamento degli ecosistemi, l'impoverimento delle disponibilità di materie prime e la tutela della salute umana da parte dei processi industriali. Il termine è stato utilizzato per la prima volta nel 1990 durante il Congresso SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*) ed è stato riconosciuto a livello internazionale con le attuali normative UNI EN ISO 14040:2006, relativa alla gestione ambientale, principi e quadro di riferimento, e la UNI EN ISO 14044:2006[59] che fissa la definizione e le linee guida.

La norma UNI EN ISO 14040:2006 scompone l'LCA secondo le seguenti fasi, tra loro dipendenti (Fig. 56):

- Definizione degli scopi e degli obiettivi (*Goal Definition and Scoping*);
- Analisi di inventario (*Inventory Analysis*);
- Analisi degli impatti (*Life Cycle Impact Assessment*);
- Interpretazione e miglioramento (*Life Cycle Interpretation*).

59 Oggi sostituita con la normativa UNI EN ISO 14044:2018, *Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida*.

Fig. 56 Schema delle fasi di un'analisi LCA, secondo la normativa UNI EN ISO 14040:2006.

La prima fase prevede la definizione degli scopi e degli obiettivi da perseguire stabilendo l'oggetto della ricerca e il suo grado di approfondimento, il destinatario, i fondi a disposizione e il campo geografico-temporale di applicazione. Particolare attenzione deve essere posta alla determinazione dell'unità funzionale, ossia quell'unità misurabile che permette di comparare tutti i flussi in entrata e in uscita dell'LCA.

L'analisi dell'inventario consiste nel determinare il totale dei flussi elementari confluiti all'interno del processo di produzione, scomponendo tutti i processi intermedi in componenti elementari sommabili tra loro, permettendo di comparare tra loro diversi scenari. I flussi elementari si dividono in input e output ambientali. Gli input sono le materie prime, l'energia elettrica e termica, l'acqua e l'uso del suolo, mentre gli output sono le emissioni in aria e in acqua, i prodotti secondari e i rifiuti. L'inventario è la fase più sensibile della valutazione del ciclo di vita di un prodotto, perché solo se effettuata in modo accurato permette di individuare eventuali miglioramenti nel processo produttivo, riducendone l'impatto ambientale (Fig. 57).

Una volta terminato l'inventario si procede ad analizzare l'impatto ambientale di un prodotto associando ad ogni fase del suo ciclo di vita i flussi elementari relativi. Così facendo è possibile analizzare nello specifico gli input e gli output di ciascun campo, ad esempio trasporto, produzione ed uso, al fine di individuare le fasi che hanno un maggior impatto ambientale e che possono essere migliorate.

Fig. 57 Schema dell'analisi d'inventario di un prodotto, secondo la normativa UNI EN ISO 14040:2006.

Nella fase di interpretazione e miglioramento, il destinatario dell'analisi LCA individuato nella prima fase, ha tutti gli strumenti necessari per proporre scenari alternativi più sostenibili, valutando anche i differenti costi ambientali.

Al fine di generare LCA confrontabili tra loro, è molto importante utilizzare dati comuni forniti da fonti accertate: le banche dati. Esse sono raccolte di dati di produzione medi forniti da associazioni specializzate in studi di LCA. Tra le associazioni più importanti in Europa, si possono citare l'IEA (*International Energy Agency*) e l'EPLA (*European Platform on Life Cycle Assessment*), e relativamente alle materie plastiche, l'APME (*Association of Plastics Manufactures in Europe*) e l'ISOPA (*European Diisocyanate & Polyol Producers Asscociation*). Tra le innumerevoli banche dati conosciute a livello nazionale e internazionale troviamo la piattaforma italiana I-LCA sviluppata dall'ISPRA (*Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale*) nell'anno 2000, la piattaforma Ecoinvent, e la Boustead Model sviluppata dall'azienda inglese *Boustead Consulting L.t.d.* Altri due database europei da cui poter attingere dati per l'analisi LCA sono il database GaBi e gli Eco-profili di *PlasticsEurope*, specializzato in polimeri plastici.

Le banche dati le informazioni necessarie per la realizzazione degli strumenti di stima dell'ecocompatibilità di un prodotto, quali marcature ecologiche, certificazioni e dichiarazioni ambientali. Nella valutazione dell'ecocompatibilità dei prodotti non bisogna limitarsi alla considerazione del numero di sistemi di energia rinnovabile impiegati nel processo produttivo, ma è utile quantificare anche il contenuto di energia primaria dei prodotti impiegati nel processo. Non è detto che un prodotto ottenuto da diverse fonti di energia rinnovabile sia più sostenibile di uno che impieghi nel sistema di produzione materie riciclate, a basso contenuto di energia primaria.

L'energia primaria è definita come quella forma di energia presente in natura, che non deriva da nessun altro processo di trasformazione. Fanno parte di questa categoria le fonti di energia rinnovabile, i combustibili fossili e l'energia nucleare. L'ammontare di energia primaria consumata per produrre un bene, dall'estrazione delle materie prime al prodotto finito, sommata all'energia potenziale contenuta nel prodotto, definisce il Contenuto di Energia Primaria (CEP), denominato anche *Gross Energy Requirement* dalla norma UNI EN ISO 14040:2006. Se si vuole calcolare la sola quantità di energia impiegata nel sistema di produzione, si fa riferimento al calcolo del Fabbisogno di Energia Primaria (FEP), definito dal D. Lgs. 192/2005.

Il contenuto di Energia Primaria è dato dalla somma di tre componenti di energia (Fig. 58):

- energia indiretta (E_i);
- energia diretta (E_d);
- energia feedstock (E_f).

L'energia indiretta è la somma delle energie primarie utilizzate per estrarre, trasportare e trasformare le materie prime necessarie per la produzione di un bene. Vanno quindi conteggiati i consumi di energia elettrica e di

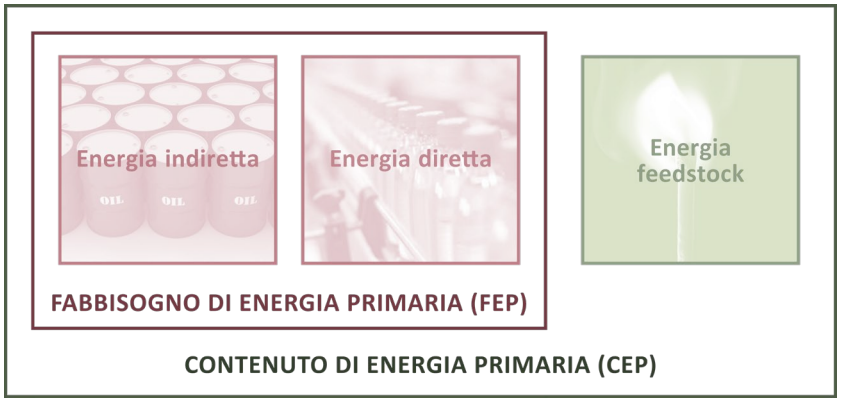


Fig. 58 Schema delle componenti energetiche del CEP.

combustibili fossili, quali petrolio, gas naturale e carbone, impiegati sia come carburanti che come materie prime estratte, sottoposte a successive trasformazioni. La valutazione dell'energia indiretta può variare in modo considerevole in funzione dell'origine delle materie prime: ad esempio, una materia prima, estratta nella stessa Nazione in cui verrà utilizzata, ha un carico energetico indiretto inferiore rispetto ad un'altra che proviene da una nazione differente, sulla quale materia gravano anche i consumi di trasporto. Un discorso simile si può affrontare per l'energia elettrica, il cui valore di energia indiretta è differente se prodotta attraverso lo sfruttamento di fonti di energia rinnovabile (energia idroelettrica o eolica) o per mezzo di combustibili fossili.

La componente di energia diretta è data dalla somma delle componenti energetiche utilizzate direttamente nella produzione di un bene. Le componenti energetiche considerate in questa fase comprendono le fonti di energia primaria (petrolio, metano, carbone) e quelle di energia secondaria (gas, benzina, coke ed elettricità), derivate dalla lavorazione delle prime. La quantificazione dell'energia diretta avviene attraverso il calcolo del potere calorifico di un combustibile, misurato in MJ/kg (o kcal/kg) per i combustibili solidi e liquidi e in MJ/m^3 (o kcal/m^3) per i combustibili gassosi.

Il potere calorifico identifica la quantità di calore prodotta dalla completa combustione di un materiale, in presenza di ossigeno e in condizioni di temperatura e pressione standard dei prodotti. Quando un materiale contiene idrogeno, si possono distinguere due tipi di potere calorifico: uno superiore e uno inferiore. Il potere calorifico superiore (*Upper Heating Value*, UHV) corrisponde alla quantità di energia ottenuta sotto forma di calore dalla combustione completa del materiale in ossigeno e alla quantità di acqua prodotta allo stato liquido. Il potere calorifico inferiore (*Lower Heating Value*, LHV) corrisponde, invece, alla quota di potere calorifico superiore privata del calore ottenuto dalla condensazione del vapore acqueo, contenuto nei gas di combustione (Tab. 14).

Combustibile	**UHV [MJ/kg]**	**LHV [MJ/kg]**
Petrolio greggio	45,53	42,68
Gas Naturale	52,21	47,13
Carbone	23,96	22,73
Carbon coke	29,86	28,60

Nafta	48,06	44,93
Gasolio	46,52	43,44

Tabella 14 Potere calorifico superiore (UHV) e inferiore (LHV) dei combustibili più comuni. Fonte: Hydrogen Tools, *Lower and Higher Heating Values of Fuels*, https://h2tools.org/hyarc/calculator-tools/lower-and-higher-heating-values-fuels

Per calcolare il Fabbisogno di Energia Primaria, dato dalla somma della componente energetica diretta e indiretta, bisogna utilizzare il potere calorifico superiore al fine di misurare la quantità di energia messa in gioco dal processo di combustione di un materiale. In questa ricerca sono stati utilizzati i poteri calorifici superiori delle fonti primarie, per calcolare i bilanci di massa e di energia, reperendo i dati utilizzati dalle Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (EPD) messe a disposizione da *PlasticsEurope*.

Per calcolare il Contenuto di Energia Primaria, è necessario quantificare l'energia di feedstock contenuta in un materiale di input, da aggiungere al Fabbisogno di Energia Primaria. L'energia di feedstock è una quantità di energia potenziale, immagazzinata in un prodotto finito, che viene sprigionata nel caso in cui il prodotto venga sottoposto a processo di combustione. Questa componente energetica viene calcolata solo per i processi di produzione di beni materiali e non per i sistemi di produzione di energia. La quota di feedstock è importante perché quantifica il potenziale calorifico dei materiali input del sistema di produzione, con riferimento al potere calorifico superiore, per manifestare la possibilità di un prodotto a fine vita di essere valorizzato per produrre energia termica, attraverso il suo incenerimento. Alti valori di feedstock identificano materiali adatti a sostituire combustibili fossili nei processi di produzione di nuovi beni, fornendo una vantaggiosa alternativa al loro accumulo in discarica. Questo tipo di soluzione può essere applicata a quei prodotti a fine vita che non siano più recuperabili attraverso processi di trasformazione, riuso e riciclo.

Per paragonare la quantità di energia impiegata nei processi di produzione dei beni, è necessario mantenere separata la quota di feedstock dall'energia diretta. Il Fabbisogno di Energia Primaria ($E_d + E_i$) costituisce il valore utilizzato per mettere a confronto la sostenibilità di un processo di produzione. Se si utilizzasse il CEP ($E_d + E_i + E_f$), le conclusioni potrebbero essere alterate da quei prodotti che contengono alti valori di feedstock.

Il rendimento di un sistema di produzione è un fattore che identifica il grado prestazionale energetico di processo produttivo. Viene calcolato attraverso la seguente relazione:

$$\eta = \frac{E_d}{(E_i + E_d)} \qquad [-]$$

Questo valore percentile mette in rapporto la quantità di energia diretta contenuta in un prodotto con l'ammontare del Fabbisogno di Energia Primaria del sistema di produzione. Maggiore è il tasso di rendimento, maggiore è la quota di energia consumata e trasformata in lavoro.

In conclusione, sulla base del Contenuto di Energia Primaria di alcuni dei più comuni materiali da costruzione, si possono confrontare i relativi impatti energetici, a parità di unità funzionale, fatto salvo che i valori possono variare in modo considerevole in funzione del processo produttivo applicato (Tab. 15).

Materiali	**CEP [MJ/kg]**
Mattoni in laterizio	1,93
Cemento Portland	6,42
Lana di roccia	14,69
Acciaio in lastre	17,02
Lana di vetro	38,42
Rame in lastre	55,80
PVC in lastre	67,71
Alluminio in lastre	84,89
Polietilene	88,00
Polistirene espanso (EPS)	88,05
Poliuretano espanso (PUR)	100,70

Tabella 15 Contenuto di Energia Primaria di alcuni materiali da costruzione. Fonte: R. Giordano, I prodotti per l'edilizia sostenibile. La compatibilità ambientale dei materiali nei processi edilizi, Sistemi Editoriali (2010).

Dalla precedente tabella si evince che i materiali compositi, quali cementi e laterizi, sono i materiali a più basso impatto energetico. Il CEP per i materiali isolanti oscilla tra valori medio-alti, in funzione della natura dell'elemento che lo compone. I metalli hanno generalmente un medio impatto energetico, eccezione fatta per l'alluminio, che richiede elevati dispendi energetici per la sua produzione. Attualmente i materiali con più alto CEP sono le materie plastiche, poiché richiedono alti consumi energetici relativi alla produzione e contengono elevati valori di energia immagazzinata.

7.1.1 Environmental Product Declaration (EPD)

Tra i vari strumenti esistenti per determinare l'ecocompatibilità di un prodotto, si è scelto di approfondire in questa tesi l'EPD, poiché è lo strumento, fornito da *Plastics Europe*, attraverso il quale sono state reperite le informazioni per costruire il bilancio di massa e di energia delle materie derivate da combustibili fossili prese in esame.

L'EPD®, o *Environmental Product Declaration*, è una Dichiarazione Ambientale di Prodotto (DAP), una certificazione riconosciuta a livello internazionale che fornisce informazioni circa l'impatto ambientale di prodotti o servizi, durante il loro ciclo di vita.

La Dichiarazione deve essere organizzata facendo riferimento all'analisi del ciclo di vita di un prodotto, basata su uno studio LCA (*Life Cycle Assessment*), che, come abbiamo visto nel paragrafo precedente, definisce il consumo di materie prime e gli impatti ambientali durante tutte le fasi del ciclo di vita del prodotto. Alcune EPD fanno riferimento a studi LCA "dalla culla alla tomba", prendendo in esame l'intera vita di un prodotto o servizio (dall'estrazione delle materie prime fino al riciclo e smaltimento), mentre la maggior parte di esse si concentra su analisi "dalla culla al cancello", focalizzandosi sui prodotti fuori opera, fornendo per essi una vera e propria "carta d'identità ambientale".[60]

Questo tipo di informazioni sono al giorno d'oggi fondamentali sia per le industrie produttrici, che hanno la possibilità di scegliere il ciclo di produzione di un bene a parità di unità funzionale ottenendo benefici dal punto

60 R. Giordano, *I prodotti per l'edilizia sostenibile. La compatibilità ambientale dei materiali nei processi edilizi,* Sistemi Editoriali (2010), p. 75.

di vista ambientale, sia per i progettisti che adoperano i prodotti fuori opera, in modo tale da poter effettuare scelte mirate perseguendo l'obiettivo di un progetto sostenibile.

Le informazioni fornite da una EPD devono essere chiare e univocamente condivise, basate su informazioni oggettive e dati scientifici, in modo tale che tutti possano trarre le stesse conclusioni, senza incorrere in fraintendimenti. Questo tipo di impostazione è regolamentata dalla normativa UNI ISO 14025:2006,[61] relativa alle etichette e dichiarazioni ambientali, in particolare alle Dichiarazioni ambientali di *Tipo III*.

Le etichette ambientali, anche definite marchi ecologici o eco-etichette, sono un sistema di identificazione volontaria per processi/prodotti/servizi, garantendo che i suddetti siano ideati e creati limitando l'impatto sull'ambiente in tutto il loro ciclo di vita o solo per ad un aspetto di esso.

Il grande vantaggio delle etichette ecologiche è che permette al consumatore di fare scelte sostenibili in modo consapevole, ma allo stesso tempo spinge i produttori all'innovazione tecnologica e al miglioramento dei loro prodotti dal punto di vista dell'impatto ambientale.

I marchi ecologici sono istituiti da organizzazioni indipendenti o istituzionali, guidate dalla normativa UNI EN ISO 14020:2002 nella realizzazione degli standard da seguire rispettivamente in ogni categoria di prodotto. Organismi certificatori hanno poi il compito di verificare la compatibilità del marchio ecologico con gli standard da rispettare.

Queste certificazioni hanno carattere selettivo, perché hanno diritto di entrarne a far parte solo quei prodotti o servizi che hanno registrato il più basso tasso di impatto ambientale per la medesima categoria, senza venir meno ad aspetti importanti come la competitività economica e qualitativa. Un altro punto a favore è il loro carattere volontario, dal punto di vista delle leggi a cui fanno riferimento: le etichette ambientali si impongono di seguire standard superiori a quelli previsti dalla legge, svincolandosi da restrizioni e conformità a cui sono strettamente legate altre certificazioni come il marchio CE in Europa.

61 Oggi sostituita dalla normativa UNI EN ISO 14025:2010, *Etichette e dichiarazioni ambientali - Dichiarazioni ambientali di Tipo III - Principi e procedure*.

Esiste una sostanziale differenza tra etichetta (o marchio) e dichiarazione ambientale, messa in luce dalla normativa di riferimento UNI EN ISO 14020:2002. Un'etichetta ambientale fa riferimento a requisiti ambientali specifici, valutabili su una scala prestazionale ben definita, mentre una dichiarazione ambientale, in genere realizzata dal produttore e verificata da esso o da terzi, dà informazioni sulle prestazioni ambientali dei prodotti e servizi presi in esame, ma senza dover sottostare a requisiti prestabiliti.

La norma UNI EN ISO 14020:2002 classifica e descrive le etichette e le dichiarazioni ambientali in tre tipologie:

- *Tipo I*: fanno parte di questa tipologia i marchi di eccellenza che sottostanno a criteri precisi e inclemenza scientifica, creati da un ente esterno e indipendente. Fa parte di questa categoria il marchio europeo di qualità ecologica *Ecolabel* (UNI EN ISO 14024:2018);
- *Tipo II*: fanno parte di questa tipologia i marchi e le dichiarazioni ambientali che auto-dichiarano produttori, importatori o distributori di beni e servizi, senza l'intervento di enti certificatori o di organizzazioni istituzionali a controllo di essi. Un esempio di questa classe è rappresentato dalle informazioni circa la percentuale di prodotto riciclato o compostato impiegata, riportate sui prodotti messi in commercio (UNI EN ISO 14021:2016);
- *Tipo III*: fanno parte di questa tipologia i marchi e le dichiarazioni ambientali che non rispettano limiti restrittivi e parametri ambientali prefissati, al contrario del *Tipo I*, ma forniscono informazioni oggettive sugli impatti ambientali del ciclo di produzione di un bene o servizio, attraverso studi LCA. Non è prevista alcuna modalità di valutazione o criteri minimi da rispettare, per cui queste dichiarazioni hanno carattere puramente informativo. Le dichiarazioni appartenenti a questa categoria sono sottoposte a controllo da parte di enti indipendenti e scritte in una forma chiara e comparabile. Tra queste rientrano, come precedentemente detto, le Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (DAP) (UNI EN ISO 14025:2010).

L'ambito di applicazione di una EPD copre tutte le categorie di prodotti e servizi. Così come per gli studi LCA, anche per l'EPD è importante definire bene l'unità funzionale del prodotto o servizio indagato, in modo da poter comparare prodotti appartenenti alla medesima categoria, distinguendoli in base al loro impatto sull'ambiente. Questo tipo di certificazione, infatti, permette alle aziende di comparare diversi sistemi di produzione per

Fig. 59 Schema delle fasi per la creazione di una EPD.

individuare quello col minore impatto e maggiore impiego di fonti di energia rinnovabile e materiali riciclati, a parità di prodotto.

Una Dichiarazione Ambientale di Prodotto mette a disposizione informazioni su un determinato range di argomenti: consumo delle risorse (rinnovabili e non rinnovabili), consumo di energia primaria, valutazione dell'effetto serra e cambiamenti climatici, con conseguente assottigliamento dello strato di ozono e creazione di piogge acide, produzione di rifiuti. Questo tipo di valutazioni ha anche ricadute importanti sulla trasparenza delle informazioni che un produttore di beni e servizi può rilasciare ai consumatori. Per realizzare una EDP è necessario definire le *Product Category Rules* (PCR), ossia le Regole Specifiche per Categorie di Prodotto, reperire le informazioni da uno studio LCA e redigere la Dichiarazione Ambientale di Prodotto (Fig. 59).

Le PCR, definite da chi realizza l'EPD per ogni categoria di prodotto, racchiudono le regole per la redazione dell'LCA e della stessa EPD. Per mezzo delle PCR, delle vere e proprie schede tecniche dei prodotti, il produttore o l'ente che organizza l'EPD stabilisce in maniera chiara e condivisa tutte le caratteristiche del prodotto o servizio. Sempre in conformità con quanto stabilisce la norma UNI EN ISO 14040:2006, le PCR devono stabilire i parametri per l'applicazione dello studio LCA, definendo l'unità funzionale, i confini dello studio, e gli aspetti ambientali più rilevanti.

Lo studio LCA, come abbiamo già appurato, permette di quantificare i consumi energetici e di valutare gli impatti ambientali del ciclo di vita di un prodotto o servizio, in base a quanto prescritto dalla normativa di riferimento e indicato dalle PCR. In questo caso, lo studio prevede di realizzare un'analisi di inventario attraverso le informazioni reperite dalle PCR e i limiti di queste, ad esempio reperendo i dati primari mancanti da banche dati esterne. Dopo aver concluso l'analisi d'inventario, è possibile destinare ad ogni effetto sull'ambiente tutti gli

impatti e le emissioni che contribuiscono alla formazione dello stesso, allocando e quantificando, per esempio, tutte le emissioni in atmosfera che contribuiscono alla formazione dell'effetto serra. Tutti i valori così ottenuti, moltiplicati per i relativi fattori di conversione, non sono immutabili nel tempo, ma sono riferiti ad un determinato periodo ed avanzamento tecnologico, prestabiliti nelle PCR. La Dichiarazione Ambientale di Prodotto, infatti, ha durata pari a due anni, favorendo il continuo aggiornamento tecnologico.

Si redige, infine, la Dichiarazione Ambientale vera e propria: un report chiaro e dettagliato che fornisce informazioni in modo trasparente sulle caratteristiche delle aziende o enti coinvolti, sul processo produttivo adottato, sul metodo di analisi e calcolo usati, sui consumi energetici, gli impatti e gli effetti prodotti sull'ambiente. Il documento così redatto, prima di essere pubblicato, deve essere sottoposto al vaglio di un organismo di certificazione autorizzato e indipendente.

Ottenuta l'approvazione da parte dell'ente preposto, l'EPD è pronta per essere pubblicata e adoperata da produttori e consumatori, per realizzare le proprie scelte in maniera sostenibile.

7.2 Bilancio energetico ambientale del prototipo NBT1

La prima fase di una *Life Cycle Assessment* di un prodotto o servizio, ai sensi della norma UNI EN ISO 14040, prevede, come descritto in precedenza, la definizione degli scopi dell'analisi e degli obiettivi da perseguire, stabilendo, in particolare, l'unità funzionale e i confini del sistema posto in analisi. Attraverso un'unità funzionale dichiarata è possibile generare analisi di volta in volta paragonabili, sulle quali effettuare valutazioni degli impatti sull'ambiente e sull'uomo nelle fasi successive.

La fase più sensibile nella costruzione di una LCA è la determinazione dell'analisi di inventario (*Life Cycle Inventory*). In questa fase si costruisce un modello semplificato dell'intera vita di un prodotto, riportando le informazioni strettamente necessarie a delineare il sistema che si vuole analizzare, avendo cura di tralasciare informazioni di dettaglio che, se pur importanti, non costituiscono un elemento cruciale al raggiungimento degli obiettivi preposti. Il primo passo da eseguire è la costruzione di un diagramma di flusso, che racchiude le operazioni interessate dal sistema analizzato, attraverso la dichiarazione esplicita degli input e output di sistema che sono presi in considerazione.

L'obiettivo di questa analisi è la costruzione di un bilancio energetico delle risorse in entrata e in uscita nel sistema di produzione dei materassi, andando a riciclare parte dei materiali racchiusi nei prodotti a fine vita, per costituire materia prima seconda di un sistema produttivo differente da quello di partenza: la produzione di pannelli isolanti, ad opera della *Secondly*. A questo prodotto si aggiunge la componente energetica di un altro sistema di produzione lineare, costituita dalla paraffina vergine che viene inserita nel materassino per generare il prototipo NBT, oggetto di studio in questa tesi.

La somma dei contributi energetici necessari alla produzione e reperimento delle materie prime, alla loro trasformazione in prodotto finito, al trasporto verso l'utente, al trattamento del rifiuto per essere riciclato e all'introduzione del nuovo materiale al suo interno determina il contenuto di energia incorporato nel prodotto (*Embodied Energy* o Contenuto di Energia Primaria).

I valori effettivi relativi alle materie prime e ai fabbisogni energetici sono stati ricavati suddividendo il lavoro

di analisi in fasi, identificando delle sub-unità funzionali, propedeutiche alla definizione dell'unità funzionale effettiva del sistema analizzato. La prima ha riguardato la definizione dell'*Embodied Energy* per i singoli materiali che sono impiegati nella produzione di un materasso, riferendosi alla sub-unità di 1 MJ/kg di materia prima. In una fase successiva la sub-unità funzionale diventa 1 MJ/kg di prodotto che proviene dal processo di lavorazione delle materie prime, ossia 1 kg di materasso. In seguito, vengono considerate le effettive quantità convogliate all'interno del materassino riciclato, per la cui fase la sub-unità funzionale considerata diventa 1 MJ/kg di materassino riciclato. Infine, per la valutazione del contenuto energetico del prototipo NBT, è stata considerata l'effettiva unità funzionale di 1 MJ/kg di prototipo.

Contestualmente a questa suddivisione, il diagramma di flusso è stato ripartito in cinque settori, costituenti le fasi principali della vita dei prodotti analizzati: *Raw Materials*, *Manufacturing*, *Use*, *Recycling* e *Prototyping*.

Il primo settore comprende dati e informazioni circa i principali materiali costituenti i materassi: la schiuma flessibile di poliuretano e le fibre tessili, naturali e sintetiche. Fanno parte del sistema, i dati circa l'estrazione delle materie prime, il loro trasporto e la loro lavorazione per divenire materiali pronti a costituire nuovi prodotti.

Per il *Manufacturing*, sono stati reperiti dati sul trasporto dei materiali verso l'azienda, la produzione di materassi tradizionali a molle e la loro distribuzione a corto raggio.

Per i primi due settori è stata effettuata un'analisi "*cradle-to-gate"* ("dalla culla al cancello"), secondo la quale fanno parte del bilancio i dati relativi al reperimento delle materie prime, al trasporto in azienda e alla produzione di un determinato prodotto. In una catena di produzione, ciò che è prodotto finito in una fase, diviene materia prima per la fase successiva.

Il settore *Use* indica la vita utile di un materasso tradizionale, di circa 10 anni, durante i quali il prodotto mantiene inalterato il suo contenuto di energia immagazzinato.

Alla fine della sua vita utile, il materasso diventa rifiuto ed è destinato ad essere smaltito in discarica o, come nel caso analizzato, ad essere riciclato. Come è stato già affermato in precedenza, la maggior parte dei materiali

che compongono un materasso possono essere riciclati e divenire materia di input in un nuovo sistema produttivo. In questo diagramma sono state considerate unicamente le percentuali di materiale riciclato che costituiscono il materassino prodotto dalla *Secondly*. In questa analisi, purtroppo, non sono stati reperiti dati sul trasporto dei materassi a fine vita verso il sistema di trattamento del rifiuto, informazione rilevante nella valutazione della sostenibilità di un processo di riciclo. Ciò che, invece, è stato considerato, grazie alle informazioni reperite dall'azienda, sono i dati sui consumi energetici necessari alla produzione del nuovo materassino. Questa fase comprende la separazione dei diversi materiali del materasso, la loro triturazione, miscelazione e ricomposizione nel nuovo pannello isolante. Da questo settore si considera un'analisi di tipo "*grave or cradle*": il riciclo può essere considerato come la "tomba" del prodotto, con la dismissione del bene giunto a fine vita, o una nuova "culla" per un nuovo ciclo di produzione.

L'ultimo settore analizzato, il *Prototyping*, accoglie la filiera di produzione lineare della paraffina, andando a bilanciare in peso il contributo energetico dei due prodotti che si fondono, dando origine al prototipo NBT. In questo diagramma, è stato riportato, in particolare, il contenuto di energia primaria del prototipo NBT1, contenente il 25% in volume di paraffina.

Il sistema di riciclo applicato per questo prodotto è il riciclo aperto, o *open loop recycling*, contraddistinto dal fatto che un materiale output, ottenuto come scarto di lavorazione o dal trattamento di riciclo di un bene a fine vita, sia immesso come materiale input in un sistema di produzione differente da quello di partenza. Questo implica che la valutazione dell'impatto ambientale di un prodotto ottenuto da un riciclo aperto deve tenere conto dell'impatto ambientale dei processi che il bene ha subito in precedenza.

Esistono due metodi per valutare il contenuto di energia incorporato in un materiale ottenuto da un riciclo aperto, entrambi riportati nei due schemi rappresentati: il primo considera il totale degli apporti energetici che convergono nel prodotto finito (il prototipo NBT1), il secondo trascura gli apporti energetici di produzione del bene a fine vita (il materasso) e considera unicamente la quota di feedstock ancora presente nei materiali riciclati, come energia potenziale che può essere recuperata, invece di essere condotta in discarica.

Per la costruzione del bilancio energetico, è stato necessario cercare fonti secondarie (banche dati) che

fornissero dati relativi ai consumi energetici e di risorse primarie per la produzione dei materiali analizzati. Per quanto riguarda la fase di riciclo, sono stati reperiti dati dalla fonte primaria (l'azienda *Secondly*).

I materiali che compongono il materassino prodotto dalla *Secondly*, in percentuali diverse, sono tre: la schiuma flessibile di poliuretano (50%), i tessuti sintetici e naturali (30%) e le fibre di poliestere (20%). Per questo motivo, per creare il diagramma di flusso, si è deciso di raggruppare i materiali che costituiscono i materassi in questi tre gruppi. Nella fase di *Prototyping*, vi è l'introduzione del materiale vergine: la cera di paraffina.

I dati relativi alla produzione della schiuma di poliuretano sono stati ricavati dalle schede EPD nella sezione "*Eco-profile*" della banca dati *PlasticsEurope*. Per costruire una EPD, *PlasticsEurope* collabora con banche dati come *GaBi* e *Boustead Model* e con associazioni di aziende produttrici come ISOPA. I dati forniti sono valori medi annui con riferimento all'anno 2013. Questi dati sono considerati attendibili dalle aziende per 10 anni, ossia fino all'anno 2023, lasso di tempo in cui non si verificano sostanziali cambiamenti tecnologici nella catena di produzione. I dati di produzione primari del poliuretano provengono da sette aziende europee. Il confine geografico di riferimento è l'Europa e i risultati dello studio possono essere, dunque, applicati all'interno dell'UE, mentre, per essere utilizzati in altri Paesi, dovrebbero subire degli adeguamenti.

I valori dei tessuti misti naturali e sintetici sono stati ottenuti per associazione ai dati di produzione delle fibre di cotone, contenuti in un LCA effettuato da Kalliala et al.[62] Questo studio metteva a confronto i dati delle fibre di cotone con le fibre di poliestere. Dalla stessa ricerca, dunque, sono stati ricavati i dati sul poliestere.

I dati sulla paraffina, invece, sono stati ricavati dai dati di produzione della nafta grazie ad un parallelismo. Un articolo scientifico, scritto da Tuffvesson et al.[63], ha analizzato l'LCA della cera di paraffina, valutando che per 1 kg di paraffina potevano essere considerati i contributi energetici di 2 kg di nafta. I valori della nafta sono stati ricavati, come per il poliuretano, dalle schede EPD di *PlasticsEurope*.

62 E. M. Kalliala, P. Nousiainen, *Life Cycle Assessment: environmental profile of cotton and polyester-cotton fabrics*, AUTEX Research Journal, vol. 1, n.1 (1999), p. 18.

63 L. M. Tufvesson, P. Börjesson, *Wax production from renewable feedstock using biocatalysts instead of fossil feedstock and conventional methods*, The International Journal of Life Cycle Assessment, vol. 13 (2008), pp. 328–338.

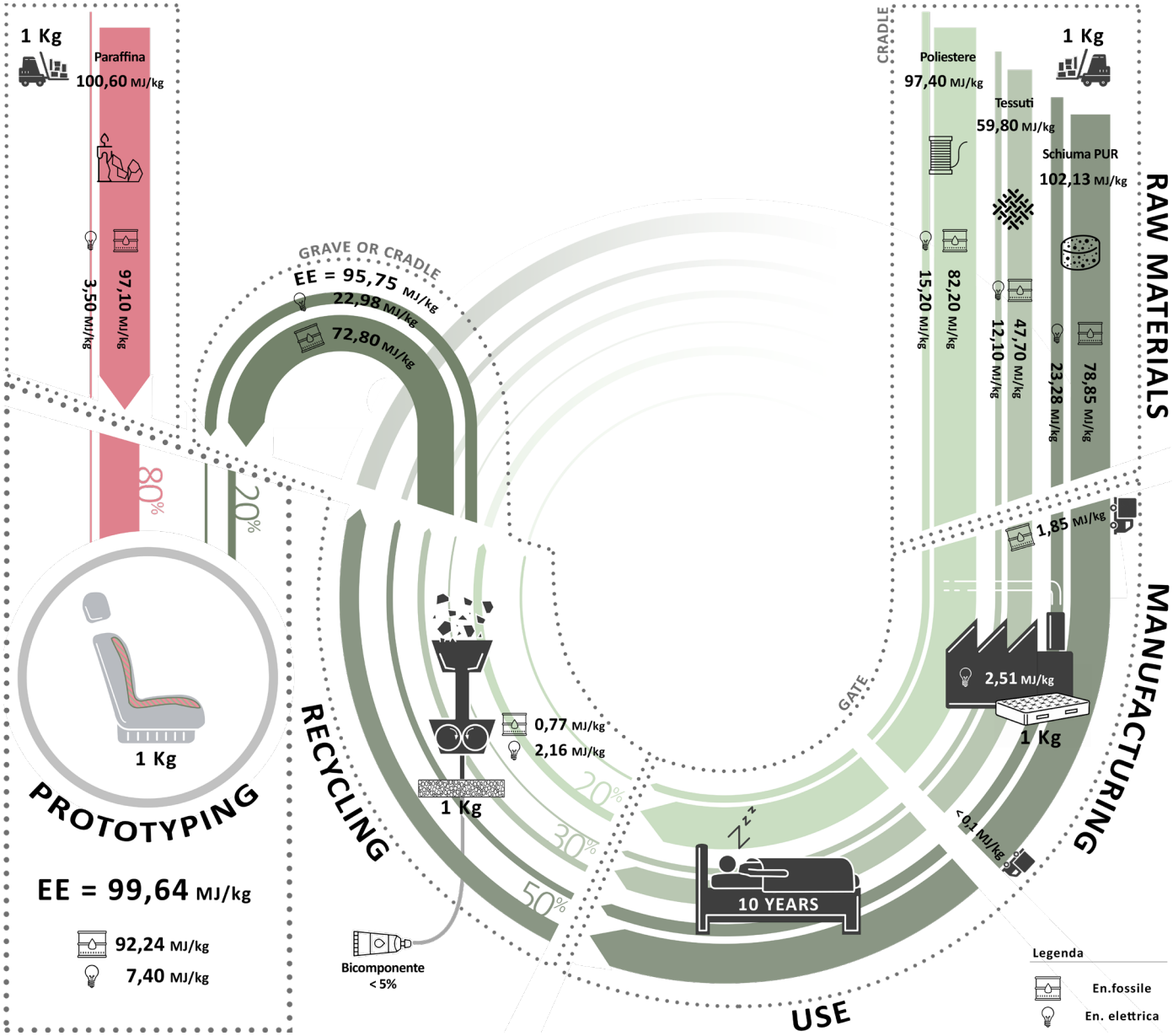


Fig. 60 Diagramma di flusso del bilancio energetico del primo metodo.

Analizzando il primo bilancio riportato in Fig. 60, si può vedere che *PlasticsEurope* riporta, per la produzione di 1 kg di schiuma flessibile di poliuretano di densità pari a 35-40 kg/m^3, un fabbisogno di energia di origine fossile pari a 78,85 MJ/kg e di energia elettrica pari a 23,28 MJ/kg, per un totale di EE = 102,14 MJ/kg.[64] Per le fibre di poliestere, si sono riscontrati valori di energia derivata da fonti fossili pari a 82,20 MJ/kg e 15,20 MJ/kg di energia elettrica, che sommati tra loro danno un valore complessivo di EE = 97,40 MJ/kg.[65] I tessuti misti, che come sopra citato, sono stati associati al ciclo di produzione del cotone, registrano un dispendio di energia fossile pari a 47,70 MJ/kg e di energia elettrica pari a 12,10 MJ/kg, per un totale di EE = 59,80 MJ/kg.[66] Da questi valori si può notare come le materie plastiche abbiano un impatto, per unità funzionale, notevolmente maggiore rispetto alle fibre naturali, quali il cotone.

In seguito alla loro produzione, i materiali sono spediti alle aziende per produrre beni. Il trasporto è un elemento che influisce notevolmente sui prezzi dei prodotti e maggiore è la distanza percorsa, maggiore è l'impatto che questi hanno sull'ambiente (soprattutto se si utilizzano mezzi alimentati a combustibili fossili). In questa analisi, non avendo fonti dirette sul trasporto delle materie prime, si è utilizzato come riferimento un LCA sulla produzione di materassi in Portogallo, riportato in un articolo scientifico. Lanoe et al.[67] riportano le distanze percorse dalle materie prime fino all'impianto di produzione dei materassi: 1167 km per la schiuma PUR, 2000 km per i tessuti e 60 km per le fibre di poliestere. Il totale percorso da tutti i materiali è quindi pari a 3227 km. Il contributo energetico del trasporto è stato calcolato trasformando i kg di gasolio consumati in MJ/kg, moltiplicando per il potere calorifico superiore del gasolio (44,60 MJ/kg) e dividendo per il carico di trasporto.

I materiali trasportati sono quindi pronti per la produzione dei materassi. Lanoe et al. affermano che per produrre un materasso del peso di 30,57 kg sia necessario un fabbisogno di 21,32 kWh di energia elettrica. Convertendo i kWh in MJ e poi dividendo il risultato per il peso del materasso, si ottengono i MJ di energia elettrica spesi per produrre 1 kg di materasso, e questo valore è pari a 2,51 MJ/kg.

---

64 I. Boustead, *Eco-profiles of the European Plastics Industry. Polyurethane flexible foam* (Marzo 2005), p. 8.

65 E. M. Kalliala, P. Nousiainen, *Life Cycle Assessment: environmental profile of cotton and polyester-cotton fabrics*, AUTEX Research Journal, vol. 1, n.1 (1999), p. 18.

66 *Op. cit.*

67 T. Lanoë, C. L. Simões, R. Simoes, *Improving the environmental performance of bedding products by using life cycle assessment at the design stage*, Journal of Cleaner Production 52 (2013), p. 159.

Lo stadio successivo al *Manufacturing* è lo *Use*, fase in cui il consumatore utilizza il materasso per una durata media di circa 10 anni. Durante questi anni, il suo contenuto di energia primaria rimane invariato.

Il contributo del trasporto dei materassi dall'azienda produttrice ai venditori è stato stimato da Lanoe et al. in 70 km, ed è stato considerato trascurabile nel conteggio energetico di questo bilancio, perché inferiore a 0,1 MJ/kg. E' assente il dato sul trasporto dei materassi dal consumatore alla discarica e alle aziende di riciclo, perché non è stato reperito.

Durante la fase di riciclo, i materassi vengono separati per materiale, triturati e riassemblati creando materassini riciclati con quantità di materiali diverse. Per i materiali contenuti nel materassino, si è calcolato il corrispondente contenuto di energia con riferimento alle diverse percentuali, per conoscere i MJ contenuti in un 1 kg di materassino riciclato. La componente della colla è stata trascurata dal calcolo in quanto è presente in un quantitativo inferiore al 5% in peso.

Dai dati forniti dalla *ReMat*, è stato possibile ricavare i costi e quindi i consumi di energia necessari ad attuare la fase di riciclo e di produzione del nuovo materassino riciclato. Il fabbisogno dichiarato di energia elettrica è pari a 0,6 kWh per 1 kg di materassino, che equivalgono a 2,16 MJ/kg di energia. Al consumo elettrico si affianca una componente di gas metano di 0,033 m^3/kg, che equivalgono a 0,77 MJ/kg.

Aggiungendo i valori del consumo di energia per il processo di riciclo ai precedenti, si ottiene un totale di 72,80 MJ/kg di energia fossile e di 22,98 MJ/kg di energia elettrica. L'EE del materassino riciclato è stato quindi stimato pari a **95,75 MJ/kg**.

Arrivati a questo punto, il materassino generato può uscire dal sistema circolare di cui faceva parte ed entrare in un nuovo sistema lineare, quello della prototipazione. In questa fase, la paraffina vergine è aggiunta al materassino per il 25% in volume, corrispondente al 80% del peso del prototipo NBT1. Questa grande differenza di quantità è dovuta all'elevata densità della paraffina rispetto alla matrice poliuretanica.

La paraffina ha un elevato contenuto energetico di partenza, pari a 100,60 MJ/kg,[68] di cui solo 3,50 MJ/kg è il valore dell'energia elettrica mentre 97,10 MJ/kg sono i fabbisogni di energia derivante da fonti fossili. Calcolando l'80% di questi valori e il 20% dell'energia del materassino riciclato, e poi sommandoli tra di loro, si ottiene il valore totale di EE del prototipo NBT1 che è pari a **99,64 MJ/kg**. Di questo valore, 92,24 MJ/kg è la componente di energia fossile e 7,40 MJ/kg è l'energia elettrica.

Il secondo diagramma (Fig. 61) considera i materiali che confluiscono nel riciclo per la loro componente di feedstock, che è l'unico contributo energetico ancora utilizzabile in un prodotto EOL, trascurando dunque gli apporti energetici impiegati per la produzione del materasso. Per i materiali vergini, invece, si considera il totale del Contenuto di Energia Primaria, suddiviso in Fabbisogno di Energia Primaria (En. Diretta + En. Indiretta) e Energia Feedstock. Questo metodo mette in evidenza la quota di energia recuperabile attraverso il riciclo, che altrimenti andrebbe dispersa, oltre a far emergere la differenza tra l'energia impiegata per produrre un bene riciclato e uno vergine. Ci si aspetterà, quindi, un valore di EE finale minore.

I *raw materials* hanno un contenuto di energia così suddiviso: 68,66 MJ/kg di FEP e 33,47 MJ/kg di feedstock per la schiuma PUR, 59,80 MJ/kg di FEP e 0 MJ/kg di feedstock per i tessuti misti, 47,33 MJ/kg di FEP e 50,07 MJ/kg di feedstock per le fibre di poliestere. Per i tessuti, il valore di feedstock è nullo, perché il cotone non contiene idrocarburi fossili, essendo una fibra naturale.

Per calcolare la quota di energia presente in 1 kg di materassino riciclato, si sono calcolate le percentuali dei valori precedenti: la schiuma di poliuretano, presente per il 50% in peso, ha un contenuto di feedstock di 16,74 MJ/kg, i tessuti misti hanno un valore nullo e le fibre di poliestere hanno un valore di 10,01 MJ/kg (20%). Il valore totale di energia di *feedstock* del materassino, ammonta quindi a 26,75 MJ/kg, mentre il contributo di energia indiretta del processo di riciclo è pari a 2,93 MJ/kg. Confrontando l'*Embodied Energy* del materassino riciclato del primo diagramma con il secondo, si evince che nel secondo caso il valore totale è nettamente inferiore: **29,68 MJ/kg** contro i 95,75 MJ/kg precedenti.

68 I. Boustead, *Eco-profiles of the European Plastics Industry. Naphtha* (Marzo 2015), p. 9.

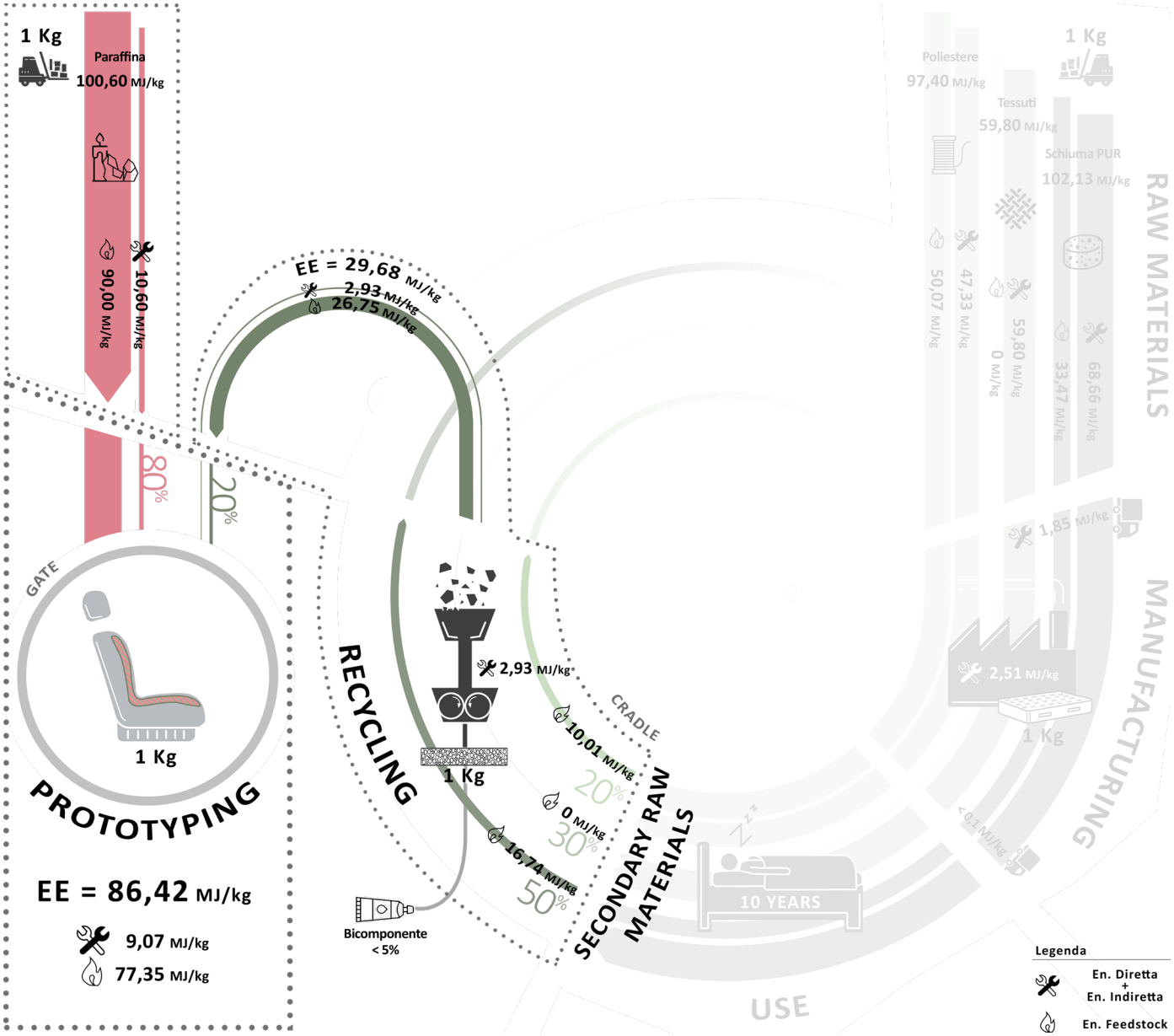


Fig. 61 Diagramma di flusso del bilancio energetico del secondo metodo.

La paraffina ha un contenuto di *feedstock* pari a 90,0 MJ/kg e un contenuto di energia diretta e indiretta di 10,60 MJ/kg (FEP). L'80% corrisponde a 72,0 MJ/kg di feedstock e 8,48 MJ/kg di FEP. Le quote del materassino riciclato, ridotte al 20%, sono invece uguali a 5,35 MJ/kg di energia di feedstock e 0,59 MJ/kg di energia indiretta di produzione.

Il contenuto totale di energia di feedstock del prototipo NBT1 è quindi uguale a 77,35 MJ/kg e il contenuto FEP ammonta a 9,07 MJ/kg, per un totale di **86,42 MJ/kg**. L'elevata quantità di feedstock contenuta nella paraffina fa aumentare il contenuto di energia del materassino riciclato.

Nel bilancio energetico non è stata considerata una possibile fase di riciclo del prototipo. Questo, giunto a fine vita, verrebbe considerato "Rifiuto Speciale" secondo il D. Lgs. 205/2010, essendo un materiale composito contenente un derivato del petrolio. Dovendo ipotizzare un possibile scenario di riciclo, la prima ipotesi sarebbe la termovalorizzazione, in quanto si sfrutterebbe l'elevato contenuto di feedstock in esso immagazzinato. Questa soluzione non prevede ulteriori trattamenti e dispendi di energia, ad esclusione del trasporto del rifiuto alla centrale di termovalorizzazione. Una seconda ipotesi possibile, è la separazione della paraffina dalla matrice poliuretanica attraverso cicli di fusione che permettano di recuperare il PCM reimpiegabile in altre applicazioni.

8

CONCLUSIONI

L'obiettivo generale che questa tesi si è prefissata di raggiungere è quello di trovare possibili applicazioni ai materiali derivanti dal riciclo di materassi a fine vita. Come si è riscontrato nelle ricerche effettuate, i materassi costituiscono rifiuti ingombranti per cui è difficile trovare soluzioni di smaltimento diverse dalla termovalorizzazione e dal deposito in discarica. Solo alcune aziende hanno cominciato a trattare questo rifiuto come fonte di produzione di materie prime seconde. Dalla collaborazione con le aziende *Secondly* in Francia, *Cormatex* in Italia e con la startup *ReMat*, è nato lo studio di un pannello composto da schiume flessibili di poliuretano e fibre tessili naturali e sintetiche riciclate. A questo si è scelto di addizionare un materiale a cambiamento di fase, per dare origine ad un prototipo isolante con proprietà termiche dinamiche.

Per conoscere le caratteristiche dei materiali che compongono il prototipo, si è descritto il processo di produzione della schiuma flessibile di poliuretano e della paraffina, dall'estrazione delle materie prime al prodotto finito, osservando anche l'impatto che questi materiali hanno sull'ambiente. Per la schiuma PUR, si è riscontrata l'esistenza di differenti tecniche di riciclo, che offrono l'opportunità di trovare nuove applicazioni.

In base alla natura del prototipo, sono state ipotizzate come idonee le applicazioni in ambienti di dimensioni contenute, soggetti ad elevato surriscaldamento, quali padiglioni temporanei, box da cantiere e veicoli. Il settore *automotive* è stato selezionato come oggetto di indagine in questa tesi, fissando come obiettivo specifico il miglioramento delle condizioni di comfort termico, attraverso la riduzione delle elevate temperature interne registrate durante il periodo estivo.

La progettazione del prototipo NBT è stata eseguita partendo dal bilanciamento dei materiali che lo compongono, seguito dallo studio delle tecniche di imbibizione, fino all'inserimento in un involucro plastico per consentirne l'applicazione funzionale. Il prototipo è stato realizzato in laboratorio in due campioni, contenenti due percentuali diverse di PCM. Essi sono stati sottoposti a due analisi termiche sperimentali, una diretta e una indiretta. L'analisi diretta è stata realizzata mediante la misurazione del flusso di calore con *l'Heat Flow Meter*, che ha permesso di conoscere i parametri di conducibilità termica e di entalpia in funzione della temperatura. Dall'analisi si è riscontrato che il solo materassino riciclato ha una buona capacità isolante, per cui sarebbe indicata un'applicazione in edilizia. I valori misurati del prototipo NBT1, contenente la paraffina RT 35, hanno

restituito una conducibilità termica pari a λ = 0,059 W/mK e un'entalpia complessiva di 133,12 kJ/kg. Il valore di conducibilità termica è risultato di poco inferiore a quello stimato, mentre l'entalpia in funzione della temperatura ha registrato una perdita prestazionale considerevole rispetto a quella dichiarata dalla casa produttrice. L'analisi indiretta è stata condotta attraverso la costruzione di un modello digitale, studiato con l'ausilio del software di modellazione termica dinamica WUFI Plus. Il modello ha permesso di confrontare sei scenari di progetto con tre paraffine a diversa temperatura di fusione (35 °C, 42 °C, 44 °C). I risultati ottenuti hanno permesso di individuare il prototipo NBT1 nello scenario S_1 come soluzione preferibile.

Il prototipo NBT1 è stato valutato, infine, anche dal punto di vista ambientale, per il suo contenuto di *Embodied Energy*, attraverso la costruzione di un bilancio energetico che descrive le diverse fasi di vita di un materasso, dalla produzione delle materie prime al prodotto riciclato. Il contenuto di energia dei materiali e dei processi produttivi antecedenti al riciclo rimangono immagazzinati all'interno del prodotto, rappresentando un elevato contenuto di *Embodied Energy*. Parallelamente, è stato costruito un secondo bilancio che considera le materie riciclate come *secondary raw materials*, dalle quali si ricava il contenuto di energia feedstock recuperabile, tralasciando gli apporti energetici dei precedenti processi produttivi. Confrontando i due diagrammi, dal secondo si è potuto notare una sostanziale diminuzione dell'EE del materassino riciclato, mentre la differenza di energia tra il prototipo NBT1 nel primo e nel secondo diagramma non è così alta, a causa dell'elevato contributo di feedstock della paraffina.

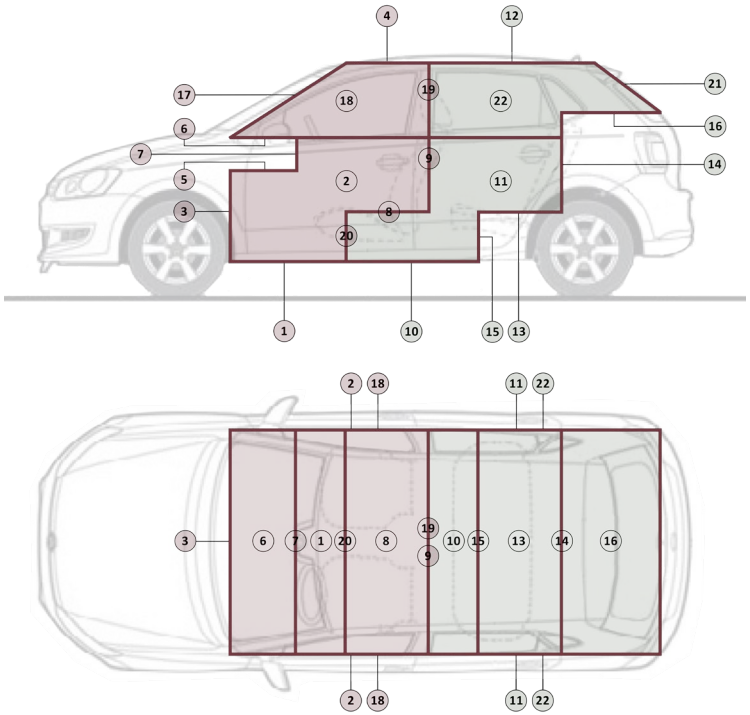
In una ricerca futura si potranno indagare le possibili variazioni di questo prototipo, valutando l'inserimento di un altro tipo di PCM, ad esempio i sali idrati, che risultano meno prestanti delle paraffine, ma portano con sé il vantaggio di non essere infiammabili. Si potranno studiare altri rapporti percentili di PCM in base a nuove applicazioni individuate, adattando di volta in volta le prestazioni ottenute agli obiettivi da coprire. Un'alternativa ancora possibile è la sostituzione della matrice poliuretanica con un altro materiale riciclato, poroso e chimicamente compatibile con il PCM.

Per l'applicazione individuata in questa tesi, sarebbe interessante inserire il prototipo all'interno di un veicolo reale, per valutarne l'efficacia anche in condizioni transitorie. In questo modo, sarà possibile determinare i

benefici tratti dalla riduzione dei consumi per la climatizzazione dell'abitacolo e dall'aumento di autonomia, tema particolarmente cruciale per lo sviluppo dei veicoli elettrici. Contestualmente bisognerebbe approfondire la progettazione del composto per gli aspetti legati al pericolo d'incendio, all'ergonomia e alla variazione dei consumi in funzione del peso aggiunto. In ultimo, bisognerebbe valutare i costi di produzione e di applicazione nel veicolo.

APPENDICE

Stratigrafie del modello allo stato di fatto



Numerazione degli elementi del modello in prospetto e in pianta:

(1) pianale anteriore;
(2) portiere anteriore;
(3) fronte;
(4) cielo anteriore;
(5) cruscotto inferiore;
(6) cruscotto superiore;
(7) cruscotto verticale;
(8) sedile anteriore;
(9) schienale anteriore;
(10) pianale posteriore;
(11) portiere posteriori;
(12) cielo posteriore;
(13) sedile posteriore;
(14) schienale posteriore;
(15) sotto sedile;
(16) copri-bagagliaio;
(17) parabrezza;
(18) finestrini anteriore;
(19) apertura superiore;
(20) apertura inferiore;
(21) lunotto;
(22) finestrini posteriore.

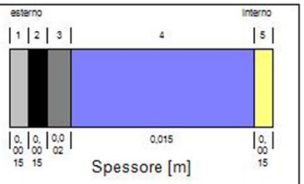
Elementi 1 - 10: pianale anteriore e posteriore

Strati omogenei

Resistenza termica: 0,428 m²K/W (senza Rsi, Rse)

Coefficiente di trasferimento calore (Trasmittanza U): 1,568 W/m²K

Spessore: 0,022 m



Nr.	Materiale/Strato (dall'esterno all'interno)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Spessore [m]	Colore
1	PVC membrane	1500	1500	0,2	0,002	
2	Metal Deck, unperforated	7800	450	46	0,002	
3	Bitume	1100	1500	0,17	0,002	
4	Feltro	70	2500	0,04	0,015	
5	Poliestere tessuto	20	240	0,045	0,002	

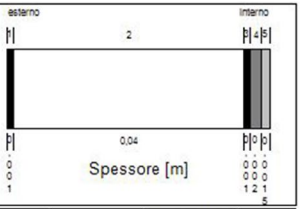
Elementi 2 - 11: portiere anteriori e posteriori

Strati omogenei

Resistenza termica: 0,193 m²K/W (senza Rsi, Rse)

Coefficiente di trasferimento calore (Trasmittanza U): 2,753 W/m²K

Spessore: 0,046 m



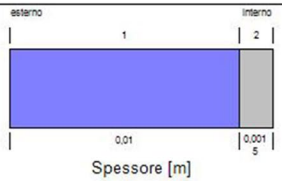
Nr.	Materiale/Strato (dall'esterno all'interno)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Spessore [m]	Colore
1	Metal Deck, unperforated	7800	450	46	0,001	
2	Strato d'aria 40 mm; senza accumulo umidità aggiuntiva	1,3	1000	0,23	0,04	
3	Metal Deck, unperforated	7800	450	46	0,001	
4	Bitume	1100	1500	0,17	0,002	
5	PVC membrane	1500	1500	0,2	0,002	

Elemento 3: fronte

Strati omogenei

Resistenza termica: 0,258 m²K/W (senza Rsi, Rse)

Coefficiente di trasferimento calore (Trasmittanza U): 2,339 W/m²K



Spessore: 0,012 m

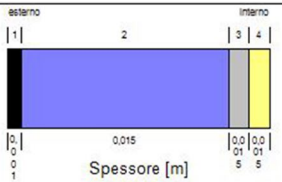
Nr.	Materiale/Strato (dall'esterno all'interno)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Spessore [m]	Colore
1	Feltro	70	2500	0,04	0,01	
2	PVC membrane	1500	1500	0,2	0,002	

Elementi 4 - 12: cielo anteriore e posteriore

Strati omogenei

Resistenza termica: 0,416 m²K/W (senza Rsi, Rse)

Coefficiente di trasferimento calore (Trasmittanza U): 1,799 W/m²K



Spessore: 0,019 m

Nr.	Materiale/Strato (dall'esterno all'interno)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Spessore [m]	Colore
1	Metal Deck, unperforated	7800	450	46	0,001	
2	Feltro	70	2500	0,04	0,015	
3	PVC membrane	1500	1500	0,2	0,002	
4	Poliestere tessuto	20	240	0,045	0,002	

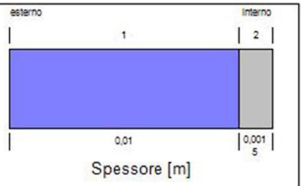
Elemento 5: cruscotto inferiore; Elemento 6: cruscotto superiore; Elemento 7: cruscotto verticale

Strati omogenei

Resistenza termica: 0,258 m²K/W (senza Rsi, Rse)

Coefficiente di trasferimento calore (Trasmittanza U): 2,516 W/m²K

Spessore: 0,012 m



Nr.	Materiale/Strato (dall'esterno all'interno)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Spessore [m]	Colore
1	Feltro	70	2500	0,04	0,01	
2	PVC membrane	1500	1500	0,2	0,002	

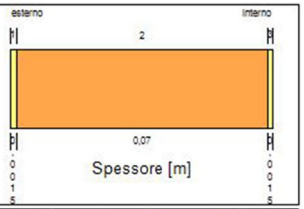
Elemento 8: sedile anteriore; Elemento 9: schienale anteriore; Elemento 13: sedile posteriore; Elemento 14: schienale posteriore

Strati omogenei

Resistenza termica: 1,817 m²K/W (senza Rsi, Rse)

Coefficiente di trasferimento calore (Trasmittanza U): 0,464 W/m²K

Spessore: 0,073 m



Nr.	Materiale/Strato (dall'esterno all'interno)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Spessore [m]	Colore
1	Poliestere tessuto	20	240	0,045	0,002	
2	Schiuma flessibile di Poliuretano	35	1470	0,04	0,07	
3	Poliestere tessuto	20	240	0,045	0,002	

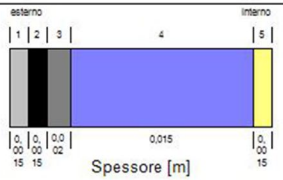
Elemento 15: sotto sedile

Strati omogenei

Resistenza termica: 0,428 m²K/W (senza Rsi, Rse)

Coefficiente di trasferimento calore (Trasmittanza U): 1,673 W/m²K

Spessore: 0,022 m



Nr.	Materiale/Strato (dall'esterno all'interno)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Spessore [m]	Colore
1	PVC membrane	1500	1500	0,2	0,002	
2	Metal Deck, unperforated	7800	450	46	0,002	
3	Bitume	1100	1500	0,17	0,002	
4	Feltro	70	2500	0,04	0,015	
5	Poliestere tessuto	20	240	0,045	0,002	

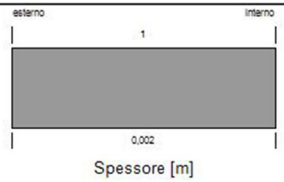
Elemento 16: copri-bagagliaio

Strati omogenei

Resistenza termica: 0,01 m²K/W (senza Rsi, Rse)

Coefficiente di trasferimento calore (Trasmittanza U): 4,545 W/m²K

Spessore: 0,002 m



Nr.	Materiale/Strato (dall'esterno all'interno)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Spessore [m]	Colore
1	PVC membrane	1500	1500	0,2	0,002	

Elementi 17 – 18 – 22 - 21: parabrezza, finestrini anteriori e posteriori, lunotto

Uw-montato	[W/m²K]	5
Coefficiente di riduzione telaio	[-]	0,80
SHGC (media irraggiamento onde corte)	[-]	0,75
SHGC emisferico	[-]	0,75
Emissività onde lunghe (media vetro/telaio)	[-]	0,84

Stratigrafie degli elementi del modello integrati con il prototipo NBT1 nello scenario S_1

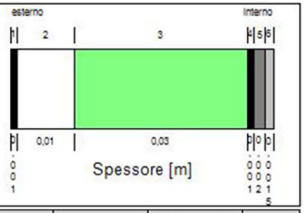
Elementi 2 - 11: portiere anteriori e posteriori

Strati omogenei

Resistenza termica: 0,505 m²K/W (senza Rsi, Rse)

Coefficiente di trasferimento calore (Trasmittanza U): 1,482 W/m²K

Spessore: 0,046 m



Nr.	Materiale/Strato (dall'esterno all'interno)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Spessore [m]	Colore
1	Metal Deck, unperforated	7800	450	46	0,001	
2	Strato d'aria 10 mm; senza accumulo umidità aggiuntiva	1,3	1000	0,071	0,01	
3	PUR+PCM 35HC_25%vol	242,5	1720	0,087	0,03	
4	Metal Deck, unperforated	7800	450	46	0,001	
5	Bitume	1100	1500	0,17	0,002	
6	PVC membrane	1500	1500	0,2	0,002	

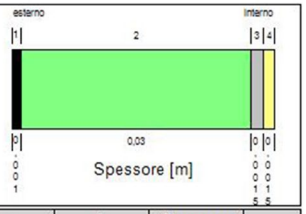
Elementi 4 - 12: cielo anteriore e posteriore

Strati omogenei

Resistenza termica: 0,386 m²K/W (senza Rsi, Rse)

Coefficiente di trasferimento calore (Trasmittanza U): 1,902 W/m²K

Spessore: 0,034 m



Nr.	Materiale/Strato (dall'esterno all'interno)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Spessore [m]	Colore
1	Metal Deck, unperforated	7800	450	46	0,001	
2	PUR+PCM 35HC_25%vol	242,5	1720	0,087	0,03	
3	PVC membrane	1500	1500	0,2	0,002	
4	Poliestere tessuto	20	240	0,045	0,002	

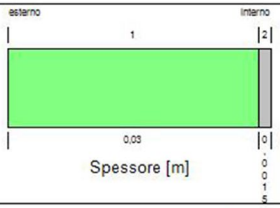
Elemento 6: cruscotto superiore

Strati omogenei

Resistenza termica: 0,352 m²K/W (senza Rsi, Rse)

Coefficiente di trasferimento calore (Trasmittanza U): 1,778 W/m²K

Spessore: 0,032 m



Nr.	Materiale/Strato (dall'esterno all'interno)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Spessore [m]	Colore
1	PUR+PCM 35HC_25%vol	242,5	1720	0,087	0,03	
2	PVC membrane	1500	1500	0,2	0,002	

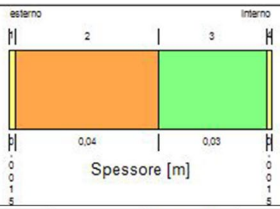
Elemento 8: sedile anteriore; Elemento 9: schienale anteriore; Elemento 13: sedile posteriore; Elemento 14: schienale posteriore

Strati omogenei

Resistenza termica: 1,411 m²K/W (senza Rsi, Rse)

Coefficiente di trasferimento calore (Trasmittanza U): 0,571 W/m²K

Spessore: 0,073 m



Nr.	Materiale/Strato (dall'esterno all'interno)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Spessore [m]	Colore
1	Poliestere tessuto	20	240	0,045	0,002	
2	Schiuma flessibile di Poliuretano	35	1470	0,04	0,04	
3	PUR+PCM 35HC_25%vol	242,5	1720	0,087	0,03	
4	Poliestere tessuto	20	240	0,045	0,002	

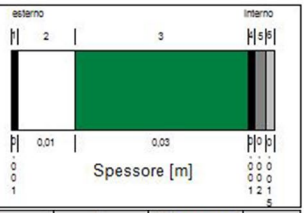
Elementi 2 - 11: portiere anteriori e posteriori

Strati omogenei

Resistenza termica: 0,379 m²K/W (senza Rsi, Rse)

Coefficiente di trasferimento calore (Trasmittanza U): 1,821 W/m²K

Spessore: 0,046 m



Nr.	Materiale/Strato (dall'esterno all'interno)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Spessore [m]	Colore
1	Metal Deck, unperforated	7800	450	46	0,001	
2	Strato d'aria 10 mm; senza accumulo umidità aggiuntiva	1,3	1000	0,071	0,01	
3	PUR+PCM 35HC_50%vol	435	1970	0,137	0,03	
4	Metal Deck, unperforated	7800	450	46	0,001	
5	Bitume	1100	1500	0,17	0,002	
6	PVC membrane	1500	1500	0,2	0,002	

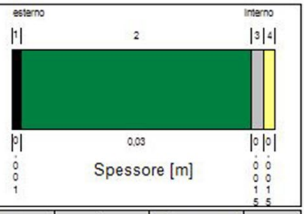
Elementi 4 - 12: cielo anteriore e posteriore

Strati omogenei

Resistenza termica: 0,26 m²K/W (senza Rsi, Rse)

Coefficiente di trasferimento calore (Trasmittanza U): 2,501 W/m²K

Spessore: 0,034 m



Nr.	Materiale/Strato (dall'esterno all'interno)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Spessore [m]	Colore
1	Metal Deck, unperforated	7800	450	46	0,001	
2	PUR+PCM 35HC_50%vol	435	1970	0,137	0,03	
3	PVC membrane	1500	1500	0,2	0,002	
4	Poliestere tessuto	20	240	0,045	0,002	

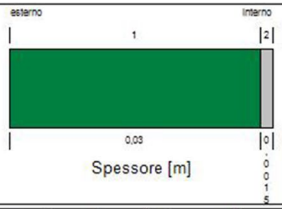
Elemento 6: cruscotto superiore

Strati omogenei

Resistenza termica: 0,226 m²K/W (senza Rsi, Rse)

Coefficiente di trasferimento calore (Trasmittanza U): 2,291 W/m²K

Spessore: 0,032 m



Nr.	Materiale/Strato (dall'esterno all'interno)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Spessore [m]	Colore
1	PUR+PCM 35HC_50%vol	435	1970	0,137	0,03	
2	PVC membrane	1500	1500	0,2	0,002	

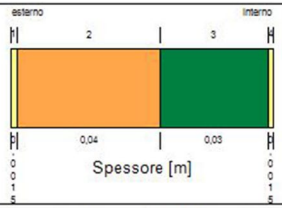
Elemento 8: sedile anteriore; Elemento 9: schienale anteriore; Elemento 13: sedile posteriore; Elemento 14: schienale posteriore

Strati omogenei

Resistenza termica: 1,286 m²K/W (senza Rsi, Rse)

Coefficiente di trasferimento calore (Trasmittanza U): 0,615 W/m²K

Spessore: 0,073 m



Nr.	Materiale/Strato (dall'esterno all'interno)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Spessore [m]	Colore
1	Poliestere tessuto	20	240	0,045	0,002	
2	Schiuma flessibile di Poliuretano	35	1470	0,04	0,04	
3	PUR+PCM 35HC_50%vol	435	1970	0,137	0,03	
4	Poliestere tessuto	20	240	0,045	0,002	

Scheda tecnica pannello

SDY 30H10 PU [69]

Secondly

FICHE TECHNIQUE PRODUIT

Référence : SDY 30H10 PU	Réalisé par : PG	Date de Réalisation : 05/09/2017
Version : 1.0	Vérifié par : TC	Date de Vérification : 06/09/2017
Paramètre Machine :	Appr. par :	Date d'Approbation :

Etabli le : 28/08/2017 Produit sur ligne : N°1 / FOUR

Désignation : SDY ISOL.30H10 PU - ESSAI

CARACTERISTIQUES	UNITE	VALEUR	TOLERANCE	DESIGNATION
Physique				
Composition	%	50	+/-10	Mousses Alvéolaires (PU & Latex)
	%	30	+/-10	Effilochage synth, naturel et PU
	%	20	+/-5	Polyester / Co-polyester
Poids	kg/m³	30	0/+2	Densité moyenne
Epaisseur	mm	100	+/-5	Hauteur totale
Inflammabilité				Sans objet
Divers				Sans objet
ASPECT				
Couleur				Crème
DIMENSION				
Forme				Plaques
Largeur	mm	Mini 720 Maxi NC	0/+10	
Longueur	mm	Mini NC Maxi 2100	0/+10	
CONDITIONNEMENT				
Palette				NC
Emballage				NC
Etiquettage				NC
LABEL	Secondly Sud-Est se réserve le droit de modifier et de mettre à jour ses produits fabriqués, après information auprès de ses utilisateurs			

69 Secondly, scheda tecnica SDY 30H10 PU.

Scheda tecnica Paraffina

RT 35[70]

Data sheet

RT35

RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature.
The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.

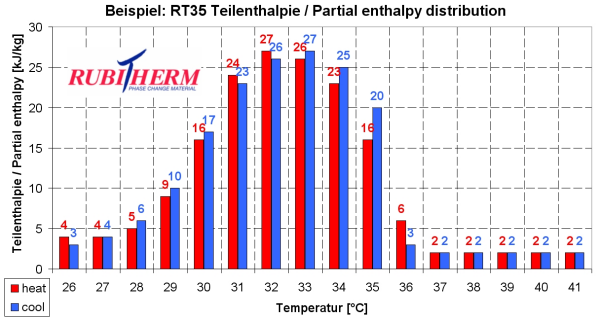
We look forward to discussing your particular questions, needs and interests with you.

Properties:
- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -4 °C and 100 °C

The most important data:

	Typical Values	
Melting area	**29-36** main peak: 33	**[°C]**
Congealing area	**36-31** main peak: 35	**[°C]**
Heat storage capacity ± 7,5%	**160**	**[kJ/kg]***
Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 26°C to 41°C.	**45**	**[Wh/kg]***
Specific heat capacity	**2**	**[kJ/kg·K]**
Density solid at 15 °C	**0,86**	**[kg/l]**
Density liquid at 45 °C	**0,77**	**[kg/l]**
Heat conductivity (both phases)	**0,2**	**[W/(m·K)]**
Volume expansion	**12,5**	**[%]**
Flash point	**167**	**[°C]**
Max. operation temperature	**65**	**[°C]**

Beispiel: RT35 Teilenthalpie / Partial enthalpy distribution



Measured with 3-layer-calorimeter.

Rubitherm Technologies GmbH
Sperenberger Str. 5a
D-12277 Berlin
Tel: +49 30 720004-62
Fax: +49 30 720004-99
E-Mail: info@rubitherm.com
Internet: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version: 31.05.2016

70 Rubitherm GmbH, Techdata RT35, https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_-RT35_EN_31052016.PDF

Scheda tecnica Paraffina

RT 35HC[71]

Data sheet

RUBITHERM

RT35HC

RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature.
The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.

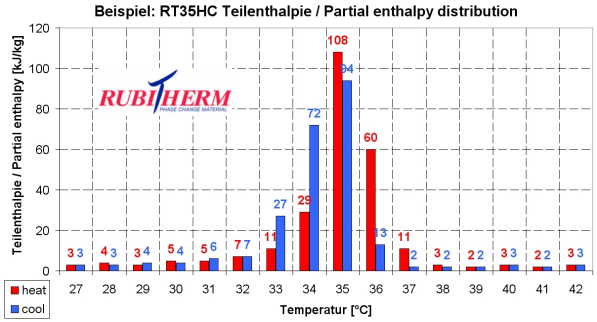
We look forward to discussing your particular questions, needs and interests with you.

Properties:
- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -4 °C and 100 °C

The most important data:

	Typical Values	
Melting area	**34-36** main peak: 35	**[°C]**
Congealing area	**36-34** main peak: 35	**[°C]**
Heat storage capacity ± 7,5% Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 27°C to 42°C.	**240**	**[kJ/kg]***
	67	**[Wh/kg]***
Specific heat capacity	**2**	**[kJ/kg·K]**
Density solid at 25 °C	**0,88**	**[kg/l]**
Density liquid at 40 °C	**0,77**	**[kg/l]**
Heat conductivity (both phases)	**0,2**	**[W/(m·K)]**
Volume expansion	**12**	**[%]**
Flash point (PCM)	**177**	**[°C]**
Max. operation temperature	**70**	**[°C]**

Beispiel: RT35HC Teilenthalpie / Partial enthalpy distribution



Measured with 3-layer-calorimeter.

Rubitherm Technologies GmbH
Sperenberger Str. 5a
D-12277 Berlin
Tel: +49 30 720004-62
Fax: +49 30 720004-99
E-Mail: info@rubitherm.com
Internet: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version: 22.01.2015

71 Rubitherm GmbH, Techdata RT 35HC, https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_-RT35HC_EN.PDF

Scheda tecnica Paraffina

RT 42[72]

Data sheet

RT42

RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature.
The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.

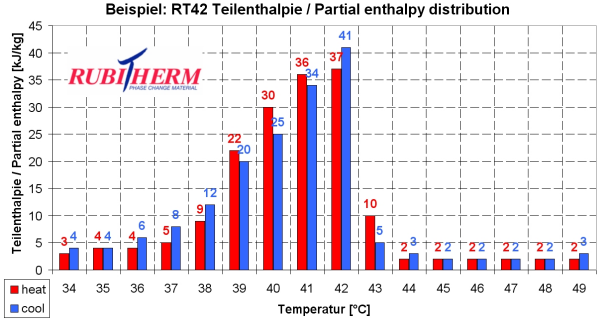
We look forward to discussing your particular questions, needs and interests with you.

Properties:
- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -4 °C and 100 °C

The most important data:

	Typical Values	
Melting area	**38-43** main peak: 41	**[°C]**
Congealing area	**43-37** main peak: 42	**[°C]**
Heat storage capacity ± 7,5% Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 35°C to 50°C.	**165**	**[kJ/kg]***
	48	**[Wh/kg]***
Specific heat capacity	**2**	**[kJ/kg·K]**
Density solid at 15 °C	**0,88**	**[kg/l]**
Density liquid at 80 °C	**0,76**	**[kg/l]**
Heat conductivity (both phases)	**0,2**	**[W/(m·K)]**
Volume expansion	**12,5**	**[%]**
Flash point	**186**	**[°C]**
Max. operation temperature	**72**	**[°C]**

Beispiel: RT42 Teilenthalpie / Partial enthalpy distribution



Measured with 3-layer-calorimeter.

Rubitherm Technologies GmbH
Sperenberger Str. 5a
D-12277 Berlin
Tel: +49 30 720004-62
Fax: +49 30 720004-99
E-Mail: info@rubitherm.com
Internet: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version: 09.05.2016

72 Rubitherm GmbH, Techdata RT 42, https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_-RT42_EN_09052016.PDF

Scheda tecnica Paraffina

RT 44HC[73]

Data sheet

RUBITHERM

RT44HC

RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature.
The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.

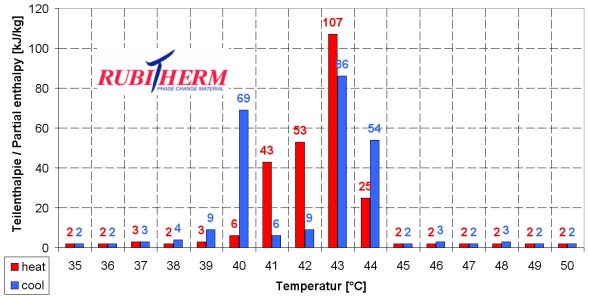
We look forward to discussing your particular questions, needs and interests with you.

Properties:
- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -4 °C and 100 °C

The most important data:

	Typical Values	
Melting area	**41-44** main peak: 43	**[°C]**
Congealing area	**44-40** main peak: 43	**[°C]**
Heat storage capacity ± 7,5%	**250**	**[kJ/kg]***
Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 35°C to 50°C.	**70**	**[Wh/kg]***
Specific heat capacity	**2**	**[kJ/kg·K]**
Density solid at 25 °C	**0,8**	**[kg/l]**
Density liquid at 80 °C	**0,7**	**[kg/l]**
Heat conductivity (both phases)	**0,2**	**[W/(m·K)]**
Volume expansion	**12,5**	**[%]**
Flash point	**>180**	**[°C]**
Max. operation temperature	**70**	**[°C]**

Beispiel: RT44HC Teilenthalpie / Partial enthalpy distribution



Measured with 3-layer-calorimeter.

Rubitherm Technologies GmbH
Sperenberger Str. 5a
D-12277 Berlin
Tel: +49 30 720004-62
Fax: +49 30 720004-99
E-Mail: info@rubitherm.com
Internet: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version: 31.05.2016

73 Rubitherm GmbH, Techdata RT 44HC, https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_-RT44HC_EN_31052016.PDF

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

QUADRO DI RIFERIMENTO E CIRCULAR ECONOMY

ARTICOLI E REPORT

[01] A. Magni, *Quanto è sostenibile il poliuretano?*, Sustainibility-Lab (2013), https://www.sustainability-lab.net/it/blogs/sustainability-lab-news/quanto-e-sostenibile-il-poliuretano.aspx [consultato nel 2018].

[02] A. Urbinati, D. Chiaroni, V. Chiesa, *Towards a new taxonomy of circular economy business models*, Journal of Cleaner Production, vol. 168 (2017), pp. 487-498, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.047

[03] Ambiente Legale, Quesiti, *Come devono essere classificati i materassi e gli stracci industriali sporchi?* (2017), https://www.ambientelegaledigesta.it/magazine/come-devono-essere-classificati-i-materassi-e-gli-stracci-industriali-sporchi

[04] Bed Times, *2013 mattress industry report available*, https://bedtimesmagazine.com/2014/05/2013-mattress-industry-report-available/ [consultato nel 2018].

[05] Bed Times, *ISPA Releases 2016 Mattress Industry Trends Report for U.S. and Global Mattress Industry*, https://bedtimesmagazine.com/2017/06/ispa-2016-mattress-industry-trends-report-released/ [consultato nel 2018].

[06] Bed Times, *Statewide mattress-recycling programs take root and flourish* (Gennaio 2017), https://cdn.coverstand.com/22801/370485/29a48f5b0089c76c0d7e8b162f1d08c77130f683.1.pdf

[07] Commissione Europea, *Comunicato stampa, Economia circolare: con le nuove norme l'UE si pone in prima linea a livello mondiale nella gestione e nel riciclaggio dei rifiuti* (2018), http://europa.eu/rapid/press-release_IP-18-3846_it.htm [consultato nel 2018].

[08] CONAI, ANCI, *La gestione dei rifiuti e dei rifiuti di imballaggio. affidamento del servizio, tariffazione e avvio a riciclo dei rifiuti da raccolta differenziata. La normativa sui rifiuti*, a cura di Ing. P. Azzurro - Consulente tecnico rifiuti ANCI Nazionale (2017), pp.1-120, http://www.anciconaiformazione.it/images/Documenti/PPT-MODULO-1-Trento.pdf

[09] Dipartimento per la Pubblica Informazione Nazioni Unite, *Trasformare il nostro mondo: Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile* (2016), https://www.unric.org/it/images/2016/April/UN_DPI_SDG_presentation_ITA_PDF.pdf

[10] Ellen MacArthur Foundation, *Towards the circular economy*, vol.1 (2013), pp. 1-98, https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf

[11] Eni, Rifiuti, *Normativa sui rifiuti* (2013), http://www.eniscuola.net/wp-content/uploads/2013/11/migrazione/assets/6801/pdf_rifiuti_3.pdf

[12] European Parlament, Briefing, *Closing the loop - New circular economy package* (2016), http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/573899/EPRS_BRI%282016%29573899_EN.pdf

[13] F. Petrucci, *Pacchetto economia circolare, dal 4 luglio 2018 in vigore le direttive sui rifiuti,* Rete Ambiente (2018), http://www.reteambiente.it/news/32130/pacchetto-economia-circolare-dal-4-luglio-2018-in/ [consultato nel 2018].

[14] GREEN JOBS, Formazione e Orientamento, *I Principi E La Legislazione Europea*, Scheda 7 (2013), https://www.cliclavoro.gov.it/Progetti/Green_Jobs/Documents/Gestione%20Rifiuti_Scheda%2007.pdf

[15] M. Sołtysiński, K. Piszczek, D. Romecki, S. Narożniak, J. Tomaszewska, K. Skórczewska, *Conversion of polyurethane technological foam waste and post-consumer polyurethane mattresses into polyols - industrial applications*, Polimery, vol. 63 parte 3 (2018), pp. 234-238, dx.doi.org/10.14314/polimery.2018.3.8

[16] Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare in collaborazione con il Ministero dello Sviluppo Economico, *Economia circolare ed uso efficiente delle risorse. Indicatori per la misurazione dell'economia circolare* (2018), pp. 1-62, http://www.minambiente.it/sites/default/files/archivio_immagini/economia_circolare_ed_uso_efficiente_delle_risorse_-_indicatori_per_la_misurazione_della_circolartita_-_bozza_maggio_2018.pdf

[17] N. César, *Troisième plateforme de recyclage de matelas pour Recyc-Matelas Europe*, L'Usine Nouvelle (2015), https://www.usinenouvelle.com/article/troisieme-plateforme-de-recyclage-de-matelas-pour-recyc-matelas-europe.N335001 [consultato nel 2018].

[18] R. Geyer, B. Kuczenski, M. Trujillo, *Assessing the greenhouse gas Savings potential of extended producer responsibility for mattresses and boxsprings in the United States*", Journal of Industrial Economy, vol. 20 parte 4 (2016), pp. 917-928, https://doi-org.ezproxy.biblio.polito.it/10.1111/jiec.12313

[19] Recyc - Matelas, *La fibre éco,* http://www.recyc-matelas.fr/PDF/plaquette.pdf [consultato nel 2018].

[20] Università degli studi di Ferrara, Ufficio Sicurezza e Ambiente, *Modulo I – Ambiente* (2011), http://ateneo.unife.it/ufficio-sicurezza-ambiente/didattica/allegati/vecchi-moduli-didattici/moduli-didattici-2012/Modulo_I_ambiente__rev-03_Sett_2011.pdf

SITI INTERNET

[21] ASviS, *Agenda 2030*, http://asvis.it/agenda-2030/ [consultato nel 2018].

[22] ASviS, *Goal e Target: obiettivi e traguardi per il 2030*, http://asvis.it/goal-e-target-obiettivi-e-traguardi-per-il-2030/ [consultato nel 2018].

[23] Bed Times, *BedTimes Supplies Guide*, https://bedtimesmagazine.com/supplies-guide/ [consultato nel 2018].

[24] Carnegie Mellon University*, EIO-LCA: Free, Fast, Easy Life Cycle Assessment*, http://www.eiolca.net/ [consultato nel 2018].

[25] Cisambiente, *Le principali novità del Pacchetto sulla Circular Economy (2018)*, https://www.cisambiente.it/le-principali-novita-del-pacchetto-sulla-circular-economy/ [consultato nel 2019].

[26] Cormatex, http://www.cormatex.it/ [consultato nel 2018].

[27] CSIL, *The world mattress industry, L'industria mondiale dei materassi* (2016), http://www.csilmilano.it/materassi/w17-settore-materassi-mondo.html [consultato nel 2018].

[28] Eco Recuperi, *Codici CER - Il Catalogo Europeo dei Rifiuti* (2016), http://www.ecorecuperi.it/it/1287-elenco-codici-cer.htm [consultato nel 2018].

[29] Ellen MacArthur Foundation, *Concept*, https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/concept [consultato nel 2018].

[30] Finanziamenti diretti della Commissione Europea, *Horizon 2020*, http://www.finanziamentidiretti.gov.it/?page_id=1936 [consultato nel 2018].

[31] Hinding Anders, http://www.hildinganders.com/ [consultato nel 2018].

[32] Idee Green, *Economia Circolare: definizione ed esempi*, https://www.ideegreen.it/economia-circolare-definizione-ed-esempi-95289.html [consultato nel 2018].

[33] Ingegneri.info, Ambiente e territorio, *Economia circolare: cosa prevede il piano di azione europeo* (2018), http://www.ingegneri.info/news/ambiente-e-territorio/economia-circolare-sostenibilita/ [consultato nel 2018].

[34] ISPA, https://www.sleepproducts.org/ [consultato nel 2018].

[35] ISPA, Pubblicazioni, https://www.sleepproducts.org/resources/publications/ [consultato nel 2018].

[36] Kastrup Recycling, https://www.kastrup-recycling.de/ [consultato nel 2018].

[37] Mattress Recycling Council, http://mattressrecyclingcouncil.org/ [consultato nel 2018].

[38] Mattress Recycling Council, *Why Recycle?,* http://mattressrecyclingcouncil.org/why-recycle/ [consultato nel 2018].

[39] Milano Bedding, https://store.milanobedding.com/it/materasso-molle-antiacaro-anatomico.html

[40] Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, *Classificazione dei rifiuti* (2013), http://www.minambiente.it/pagina/la-classificazione-dei-rifiuti [consultato nel 2018].

[41] OECD, *Extended producer responsibility*, http://www.oecd.org/env/tools-evaluation/extendedproducerresponsibility.htm [consultato nel 2018].

[42] Parlamento Europeo, Attualità, *Economia circolare: definizione, importanza e vantaggi* (2015), http://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circolare-definizione-importanza-e-vantaggi [consultato nel 2018].

[43] Parlamento Europeo, Attualità, *Pacchetto sull'economia circolare: nuovi obiettivi di riciclaggio dell'UE* (2018), http://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/society/20170120STO59356/pacchetto-sull-economia-circolare-nuovi-obiettivi-di-riciclaggio-dell-ue [consultato nel 2018].

[44] Recyc - Matelas, http://www.recyc-matelas.com/fr [consultato nel 2018].

[45] Recycling Industry, *Morbidi fuori, duri dentro* (2012), http://www.recyclingindustry.it/ita/150/morbidifuoriduridentro/ [consultato nel 2018].

[46] UnRic, *Agenda 2030*, https://www.unric.org/it/agenda-2030 [consultato nel 2018].

LEGGI E NORME

[47] D. Lgs. 152/2006, *Norme in materia ambientale*, http://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2006-04-14&atto.codiceRedazionale=006G0171

[48] D. Lgs. 205/2010, *Disposizioni di attuazione della direttiva 2008/98/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 novembre 2008 relativa ai rifiuti e che abroga alcune direttive*, http://www.camera.it/parlam/leggi/deleghe/10205dl.htm

[49] D. Lgs. 205/2010, *Disposizioni di attuazione della direttiva 2008/98/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 novembre 2008 relativa ai rifiuti e che abroga alcune direttive*, http://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2010/12/10/010G0235/sg

[50] D. Lgs. 22/1997, *Attuazione delle direttive 91/156/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/62/CE sugli imballaggi e sui rifiuti di imballaggio*, http://www.camera.it/parlam/leggi/deleghe/97022dl.htm

[51] D.P.R. 915/1982, *Attuazione delle direttive (CEE) n. 75/442 relativa ai rifiuti, n. 76/403 relativa allo smaltimento dei policlorodifenili e dei policlorotrifenili e n. 78/319 relativa ai rifiuti tossici e nocivi,* http://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1982/12/15/082U0915/sg

[52] Decisione CE 532/2000, *che sostituisce la decisione 94/3/CE che istituisce un elenco di rifiuti conformemente all'articolo 1, lettera a), della direttiva 75/442/CEE del Consiglio relativa ai rifiuti e la decisione 94/904/CE del Consiglio che istituisce un elenco di rifiuti pericolosi ai sensi dell'articolo 1, paragrafo 4, della direttiva 91/689/CEE del Consiglio relativa ai rifiuti pericolosi*, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32000D0532&from=IT

[53] Decisione CE 532/2000, *che sostituisce la decisione 94/3/CE che istituisce un elenco di rifiuti conformemente all'articolo 1, lettera a), della direttiva 75/442/CEE del Consiglio relativa ai rifiuti e la decisione 94/904/CE del Consiglio che istituisce un elenco di rifiuti pericolosi ai sensi dell'articolo 1, paragrafo 4, della direttiva 91/689/CEE del Consiglio relativa ai rifiuti pericolosi,* https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:2000D0532:20020101:IT:PDF

[54] Decisione CE 955/2014, *che modifica la decisione 2000/532/CE relativa all'elenco dei rifiuti ai sensi della direttiva 2008/98/CE del Parlamento europeo e del Consiglio*, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=celex%3A32014D0955

[55] Direttiva CE 98/2008, *Relativa ai rifiuti e che abroga alcune direttive*, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=celex%3A32008L0098

[56] Direttiva CEE 442/1975, *relativa ai rifiuti*, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=celex%3A31975L0442

[57] Direttiva CEE 689/1991, *relativa ai rifiuti pericolosi*, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A31991L0689

[58] Direttiva UE 851/2018, *che modifica la direttiva 2008/98/CE relativa ai rifiuti*, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0851&from=EN

[59] Legge 366/1941, *Raccolta, trasporto e smaltimento dei rifiuti solidi urbani,* http://web.tiscali.it/claudiosbragion/Sito/f-principali/f-basso/contenuti/2/leggi/L.%2020-03-1941%20n.366.htm

[60] Supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale n. 288 del 10 dicembre 2010, D. Lgs. 205/2010, http://www.sistri.it/Documenti/Allegati/Decreto_Legislativo_205_del_3_dicembre_2010.pdf

POLIURETANO (PUR)

ARTICOLI E REPORT

[61] A. Conte, *Industria della plastica in Europa: tutti i numeri*, In a Bottle Magazine (2018), https://www.inabottle.it/it/news/industria-plastica-europa

[62] Assorimap (a cura di C. Santagata), *La chimica circolare e il riciclo chimico* (2018), http://www.assorimap.it/index.php/news/la-parola-all-esperto/24-la-chimica-circolare-e-il-riciclo-chimico [consultato nel 2018].

[63] Europur, *Environmental Product Declaration - Flexible Polyurethane (PU) Foam* (Agosto 2015), pp. 1-45, https://www.plasticseurope.org/it/resources/eco-profiles

[64] G. Barone, *Approfondimento I - I prodotti dell'industria petrolifera: benzine*, Università Federico II di Napoli, Dipartimento Tecnologie Energetiche, http://www.dol.unina.it:8445/idea/tecnologie_energetiche/UD02/download/app_uf02.pdf

[65] GREEN JOBS, *Formazione e Orientamento,* I Principi e La Legislazione Europea, Scheda 7 (2013), https://www.cliclavoro.gov.it/Progetti/Green_Jobs/Documents/Gestione%20Rifiuti_Scheda%2007.pdf

[66] I. Boustead, *Eco-profiles of the European Plastics Industry. Naphtha* (Marzo 2015), pp. 1-15, https://www.plasticseurope.org/it/resources/eco-profiles

[67] I. Boustead, *Eco-profiles of the European Plastics Industry. Polyurethane flexible foam* (Marzo 2005), pp. 1–18, https://www.plasticseurope.org/it/resources/eco-profiles

[68] I. Boustead, *Eco-profiles of the European Plastics Industry. Polyurethane rigid foam* (Marzo 2005), pp. 1–18, https://www.plasticseurope.org/it/resources/eco-profiles

[69] ISOPA, *Fact Sheet - End-of-life Vehicles Recovery and Recycling - Polyurethane Car Components Options Analysis* (Ottobre 2003), pp. 1–7, http://www.polyurethanes.org/uploads/documents/FS_ELV_final_draft_07-10-03.pdf

[70] ISOPA, *Fact Sheet - Recycling and Recovering Polyurethanes. Chemolysis* (Giugno 2001), pp. 1-6, http://www.polyurethanes.org/uploads/documents/chemolysis.pdf

[71] ISOPA, *Fact Sheet - Recycling and Recovering Polyurethanes. Compression Moulding* (Giugno 2001), pp. 1-4, http://www.polyurethanes.org/uploads/documents/compression.pdf

[72] ISOPA, *Fact Sheet - Recycling and Recovering Polyurethanes. Energy Recovery* (Giugno 2001), pp. 1-6, http://www.polyurethanes.org/uploads/documents/energy_rec.pdf

[73] ISOPA, *Fact Sheet - Recycling and Recovering Polyurethanes. Feedstock Recycling* (Giugno 2001), pp. 1–7, http://www.polyurethanes.org/uploads/documents/feedstock.pdf

[74] ISOPA, *Fact Sheet - Recycling and Recovering Polyurethanes. Material Recycling* (Maggio 2012), pp. 1-3, https://www.isopa.org/media/2608/material-recycling.pdf

[75] ISOPA, *Fact Sheet - Recycling and Recovering Polyurethanes. Options in practise* (Novembre 2005), pp. 1–10, http://www.polyurethanes.org/uploads/documents/OptionsPractise.pdf

[76] ISOPA, *Fact Sheet - Recycling and Recovering Polyurethanes. Rebonded Flexible Foam* (Giungo 2001), pp. 1–4, http://www.polyurethanes.org/uploads/documents/rebonded.pdf

[77] ISOPA, *Fact Sheet - Recycling and Recovering Polyurethanes. Regrind/Powdering* (Giugno 2001), pp. 1-6, http://www.polyurethanes.org/uploads/documents/regrind.pdf

[78] ISOPA, *Fact Sheet - Recycling and Recovering Polyurethanes. Reuse and Reprocessing* (Maggio 2012), pp. 1-3, https://www.isopa.org/media/2617/reuse-and-reprocessing.pdf

[79] ISOPA*, Long and Short-chain Polyether Polyols for Polyurethane Products* (Aprile 2012), pp. 1-30, https://www.plasticseurope.org/it/resources/eco-profiles

[80] J. P. V. de Freitas Moreira, *Steam Cracking: Kinetics and Feed Characterisation*, Técnico Lisboa, Chemical Engineering (2015), https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1126295043834327/JVM_ExtendedAbstract.pdf

[81] K. M. Zia, H. N. Bhatti, I. A. Bhatti, *Methods for polyurethane and polyurethane composites, recycling and recovery: A review, Reactive and Functional Polymers*, vol. 67 issue 8, (2007), pp. 675-692, https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2007.05.004

[82] M. De Salve, G. Sobrero, P. F. Ariano, A. Robotto, P*roduzione dei poliuretani: analisi di rischi e formulazione di liste di controllo per la vigilanza e l'individuazione dei centri di pericolo* (1998), http://conference.ing.unipi.it/vgr2006/archivio/Archivio/1998/Articoli/a025s1.PDF

[83] PlasticsEurope, EPRO, *Plastics – the Facts 2017* (2018), https://www.plasticseurope.org/application/files/5715/1717/4180/Plastics_the_facts_2017_FINAL_for_website_one_page.pdf

[84] R. Geyer, J. R. Jambeck, K. L. Law, *Production, use, and fate of all plastics ever made*, Science Advances, vol. 3 parte 7 (2017), 10.1126/sciadv.1700782

SITI INTERNET

[85] ActionGiromari, *Poliuretano: caratteristiche e applicazioni*, http://www.actiongiromari.it/poliuretano-caratteristiche-applicazioni/ [consultato nel 2018].

[86] Chimicamo, https://www.chimicamo.org/chimica-organica/polimeri-termoindurenti-e-termoplastici.html [consultato nel 2018].

[87] ISOPA, *Polyuretanes*, http://polyurethanes.org/it_IT/che-cos-e [consultato nel 2018].

[88] Plastics Insight, *Polyurethane Properties, Production, Price, Market, and Uses*, https://www.plasticsinsight.com/resin-intelligence/resin-prices/polyurethane/ [consultato nel 2018].

[89] Secondly, http://www.secondly.fr/transformer

[90] Shopedilizia, *Che cos'è il sigillante poliuretanico*, http://www.shopedilizia.eu/cose-sigillante-poliuretanico/ [consultato nel 2018].

TESI

[91] G. Zago, *Studio dei materiali plastici a base poliuretanica: alcuni casi di studio dal Triennale Design Museum di Milano*, Università Ca' Foscari Venezia, Dipartimento di scienze e tecnologie chimiche per la conservazione ed il restauro (2014).

[92] P. Jeppsson, *Processing and recycling polyurethane as termo and temosetting plastic*, Lund Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering (2005).

[93] R. Zevenhoven, *Treatment and disposal of polyurethane wastes: options for recovery and recycling*, Helsinki University of Technology Department of Mechanical Engineering, Energy Engineering and Environmental Protection Publications (2004).

[94] S. Bonacchi, *Pirolisi di HDPE e LDPE e caratterizzazione dei prodotti di pirolisi,* Università degli Studi di Firenze, Scuola di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali, Corso di Laurea in Chimica (2017).

ARTICOLI E REPORT

[95] A. de Gracia, L. F. Cabeza, *Phase change materials and thermal energy storage for buildings*, Energy and Buildings, vol. 103 (2015) p. 414-419, https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.007

[96] A. F. Regin, S. C. Solanki, J. S. Saini, *Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 12 parte 9 (2008), p. 2438-2458, https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.06.009

[97] A. M. Khudhair, M. M. Farid, *A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials*, Energy Conversion and Management, vol. 45 parte 2 (2004) pp. 263-275, https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00131-6

[98] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, D. Buddhi, *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 13 parte 2 (2009), p. 318-345, https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005

[99] D. E. Carr, *Process for separating wax from oil*, Union Oil Company of California, cod. US2229659A, Los Angeles (1937), https://patents.google.com/patent/US2229659A/en

[100] K. Pielichowska, K. Pielichowski, *Phase change materials for thermal energy storage*, Progress in Materials Science, vol. 65 (2014) p. 67-123, https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.03.005

[101] L. F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia, A. I. Fernández, *Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15 parte 3 (2011), p. 1675-1695, https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.018

[102] R. Bodemuller, *Solvent dewaxing process*, Texaco Inc, cod. US3764517A, New York (1970), https://patents.google.com/patent/US3764517A/en?oq=US3764517A

[103] R. K. Sharma, P. Ganesan, V. V. Tyagi, H. S. C. Metselaar, S. C. Sandaran, *Developments in organic solid–liquid phase change materials and their applications in thermal energy storage*, Energy Conversion and Management, vol. 95 (2015) pp. 193-228, https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.084

[104] R. Lazzarin, M. Noro, F. Busato, *Studio di sistemi di accumulo a cambiamento di fase nel solar cooling*, Ricerca di Sistema Elettrico, ENEA (2011), http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/climatizzazione-rinnovabili/rds-256.pdf

[105] R. M. Rueff, *Wax sweating process*, BP Corporation North America Inc, cod. US4824553A, Chicago (1988), https://patents.google.com/patent/US4824553A/en?oq=us4824553a

[106] S. Riffat, B. Mempouo, W. Fang, *Phase Change Material Developments: A Review*, International Journal of Ambient Energy, vol. 36 parte 3 (2015) p. 102-115, https://doi-org.ezproxy.biblio.polito.it/10.1080/01430750.2013.823106

[107] T. Lee, D. W. Hawes, D. Banu, D. Feldman, *Control aspects of latent heat storage and recovery in concrete*, Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 62 parte 3 (2000) p. 217-237, https://doi.org/10.1016/S0927-0248(99)00128-2

[108] W. T. Knox Jr., *Paraffin wax candle*, Standard Oil Development Company, cod. US2697926A, Delaware (1949), https://patents.google.com/patent/US2697926A/e

[109] Y. Lin, Y. Jia, G. Alva, G. Fang, *Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 82 parte 3 (2018), p. 2730-2742, https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.002

TESI

[110] F. Grigolato, *Problemi e potenzialità degli accumuli termici a cambiamento di fase – Progetto di un impianto di prova*, Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali (2016).

[111] R. Zuanetto, *Accumulo termico in edifici residenziali con materiali a cambiamento di fase*, Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale (2018).

LIBRI

[112] J. G. Speight, *Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes*, Ediz. 1°, Gulf Professional Publishing (2010).

[113] J. G. Speight, *The Chemistry and Technology of Petroleum*, Chemicals Industries, Ediz. 5°, CRC Press (2014).

[114] R. H. Espach, *Manufacture of paraffin wax from petroleum*, United States Government Printing Office, Washington (1935).

LEGGI E NORME

[115] Regolamento CPL (CE 1272/2008), *relativo alla classificazione, all'etichettatura e all'imballaggio delle sostanze e delle miscele che modifica e abroga le direttive 67/548/CEE e 1999/45/CE e che reca modifica al regolamento (CE) n. 1907/2006*, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=celex%3A32008R1272

CONCEPT

ARTICOLI E REPORT

[116] A. Alahmer, A. Mayyas, A. A. Mayyas, M. A. Omar, D. Shan, *Vehicular thermal comfort models; a comprehensive review*, Applied Thermal Engineering, vol 31 iIssues 6–7 (2011), pp. 995-1002, https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.12.004

[117] A. Jamekhorshid, S. M. Sadrameli, *Application of Phase Change Materials (PCMs) in Maintaining Comfort Temperature inside an Automobile, World Academy of Science*, Engineering and Technology, International Journal of Chemical and Molecular Engineering, vol 6 n.1 (2012), pp. 33-35, http://doi.org/10.5281/zenodo.1057511

[118] B. H. Pause, *Thermal control of automotive interiors with phase change material*, cod. US20040154784A1, Longmont (2004), https://patentimages.storage.googleapis.com/84/78/7f/9ebb2bd9845fed/US20040154784A1.pdf

[119] J. Jaguemont, N. Omar, P. Van den Bossche, J. Mierlo, *Phase-change materials (PCM) for automotive applications: A review,* Applied Thermal Engineering, vol 132 (2018), pp. 308-320, https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.097

[120] K. Kim, K. Choi, Y. Kim, K. Lee, K. Lee, *Feasibility study on a novel cooling technique using a phase change material in an automotive engine*, Energy, vol 35 issue 1 (2010), pp. 478-484, https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.10.015

[121] M. Kilic, S. M. Akyol, *Experimental investigation of thermal comfort and air quality in an automobile cabin during the cooling period*, Heat and Mass Transfer, vol 48 issue 8 (2012), pp. 1375–1384, https://doi-org.ezproxy.biblio.polito.it/10.1007/s00231-012-0988-8

[122] X. Zhou, D. Lai, Q. Chen, *Experimental investigation of thermal comfort in a passenger car under driving conditions*, Building and Environment, vol 149 (2018), pp. 109-119, https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.12.022

SITI INTERNET

[123] RAL Quality Association PCM, *Application Areas - Automotive*, https://www.pcm-ral.org/pcm/en/pcm/pcm-application-areas/automotive/ [consultato nel 2018].

[124] Rubitherm Technologies GmbH, *Applications – Automotive*, https://www.rubitherm.eu/en/index.php/applications/automotive [consultato nel 2018].

PROTOTIPAZIONE

ARTICOLI E REPORT

[125] A. L. Pisello, E. Fortunati, C. Fabiani, S. Mattioli, F. Dominici, L. Torre, L. F. Cabeza, F. Cotana, *PCM for improving polyurethane-based cool roof membranes durability*, Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 160 (2017), pp. 34-42, https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.09.036

[126] M.You, X.X.Zhang, J.P.Wang, X.C.Wang*, Polyurethane foam containing microencapsulated phase–change materials with styrene–divinylbenzene co–polymer shells*, Journal of Materials Science, vol. 44 n. 12 (2009), pp. 3141–3147, https://doi-org.ezproxy.biblio.polito.it/10.1007/s10853-009-3418-7

[127] Y.G. Bryant, D.P. Colvin, *Fabric with reversible enhanced thermal properties*, Triangle Research and Development Corporation, cod. US5366801A, Raleigh N.C. (1994), https://patents.google.com/patent/US5366801

MISURAZIONE DELLE PRESTAZIONI TERMICHE

ARTICOLI E REPORT

[128] A. Tleoubaev, A. Brzezinski, L. C. Braga, *Accurate Simultaneous Measurements of Thermal Conductivity and Specific Heat of Rubber, Elastomers, and Other Materials for the 12th Brazilian Rubber Technology Congress* (2008),http://www.tainstruments.com/pdf/literature/Accurate%20Simultaneous%20Measurements%20of%20Thermal%20Conductivity%20and%20Specific%20Heat.pdf

[129] E. Carattin, M. Franz, S. Luciano (a cura di), *Materiali isolanti. Nuove tendenze in architettura*, Università Iuav di Venezia, Archivio delle Tecniche e dei Materiali per l'architettura e il disegno industriale, pp. 1-67, http://www.iuav.it/SISTEMA-DE/Archivio-d/approfondi/materiali-/Materiali_Isolanti.pdf

[130] F. Dellachà, *L'analisi termoflussimetrica: un utile ausilio per la diagnosi energetica*, Ingenio (2014), https://www.ingenio-web.it/3093-lanalisi-termoflussimetrica-un-utile-ausilio-per-la-diagnosi-energetica

[131] N. Shukla, J. Kosny, *DHFMA Method for Dynamic Thermal Property Measurement of PCM-integrated Building Materials*, Current Sust./Renew. Energy Reports, vol. 2 n.2 (2015), pp. 41-46, DOI 10.1007/s40518-015-0025-x

[132] T. Ruuska, J. Vinha, H. Kivioja, *Measuring thermal conductivity and specific heat capacity values of inhomogeneous materials with a heat flow meter apparatus*, Journal of Building Engineering, vol. 9 (2017) pp. 135-141, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.11.011

LEGGI E NORME

[133] ISO 8301:1991, *Thermal insulation -- Determination of steady-state thermal resistance and related properties -- Heat flow meter apparatus*.

[134] UNI EN 12667:2002, *Prestazione termica dei materiali e dei prodotti per edilizia - Determinazione della resistenza termica con il metodo della piastra calda con anello di guardia e con il metodo del termoflussimetro - Prodotti con alta e media resistenza termica*.

[135] ASTM C1784–14, *Standard Test Method for Using a Heat Flow Meter Apparatus for Measuring Thermal Storage Properties of Phase Change Materials and Products*, ASTM International, West Conshohocken, PA (2014), www.astm.org

MODELLAZIONE ENERGETICA DINAMICA

ARTICOLI E REPORT

[136] A. Jamekhorshid, S. M. Sadrameli, *Application of Phase Change Materials (PCMs) in Maintaining Comfort temperature inside an Automobile*, World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Chemical and Molecular Engineering, vol. 6 n.1 (2012), pp. 1-3, https://doi.org/10.5281/zenodo.1057511

[137] A. Mezrhab, M. Bouzidi, *Computation of thermal comfort inside a passenger car compartment*, Applied Thermal Engineering, v. 26, n. 14-15 (2006), pp. 1697-1704, https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.11.008

[138] E. Oró, E. de Jong, L. F. Cabeza, *Experimental analysis of a car incorporating phase change material*, Journal of Energy Storage, v. 7 (2016), pp. 131-135, https://doi.org/10.1016/j.est.2016.05.003

[139] F. Antretter, M. Winkler, M. Fink, M. Pazold, J. Radon, S. Stadler, *WUFI® Plus 3.1 Manual* (2017), https://wufi.de/de/wp-content/uploads/sites/9/2017.07_WUFI-Plus-Manual_en.pdf

[140] I. R. Dadour, I. Almanjahie, N. D. Fowkes, G.Keady, K. Vijayan, *Temperature variations in a parked vehicle*, Forensic Science International, v. 207, n. 1–3 (2011), pp. 205-211, https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2010.10.009

SITI INTERNET

[141] Rubitherm GmbH, *Techdata RT 35*, https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_-RT35_EN_31052016.PDF

[142] Rubitherm GmbH, *Techdata RT 35HC*, https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_-RT35HC_EN.PDF

[143] Rubitherm GmbH, *Techdata RT 42*, https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_-RT42_EN_09052016.PDF

[144] Rubitherm GmbH, *Techdata RT 44HC*, https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_-RT44HC_EN_31052016.PDF

VALUTAZIONE DELL'ECOCOMPATIBILITÀ DEI PRODOTTI

ARTICOLI E REPORT

[145] A. Martínez-Rocamora, J. Solís-Guzmán, M. Marrero, *LCA databases focused on construction materials: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 58 (2016), pp. 565-573, https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.243

[146] E. M. Kalliala, P. Nousiainen, *Life Cycle Assessment: Environmental profile of cotton and polyester-cotton fabrics*, AUTEX Research Journal, vol. 1, n.1 (1999), pp. 8-20, https://pdfs.semanticscholar.org/80e3/da631dd6d7d86d288275c390e63849fc4498.pdf

[147] L. M. Tufvesson, P. Börjesson, *Wax production from renewable feedstock using biocatalysts instead of fossil feedstock and conventional methods*, The International Journal of Life Cycle Assessment, vol. 13 (2008), pp. 328–338, https://link-springer-com.ezproxy.biblio.polito.it/article/10.1007/s11367-008-0004-1

[148] S. Falocco, *La metodologia dell'analisi del ciclo di vita (Life Cycle Assessment)*, Ecosistemi S.r.l., Roma, http://www.ordineingegnerics.it/spaw2/uploads/files/bioedilizia/2_3.pdf

[149] T. Lanoë, C. L. Simões, R. Simoes, *Improving the environmental performance of bedding products by using life cycle assessment at the design stage*, Journal of Cleaner Production 52 (2013), pp. 155-164, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.03.013

TESI

[150] G. Costa, R. Baciocchi, *L'ecobilancio (LCA): descrizione della metodologia e applicazione ad un caso studio*, Università di Roma Tor Vergata, Dipartimento di Ingegneria Civile (2010).

SITI INTERNET

[151] Bureau Veritas Italia, *Certificazione EPD®,* https://www.bureauveritas.it/services+sheet/certificazione-epd [consultato nel 2018].

[152] CSQA, *EPD – DAP – Che cos'è*, https://www.csqa.it/CSQA/Norme/Sostenibilita-Ambientale/EPD-DAP [consultato nel 2018].

[153] CSQA, https://www.csqa.it/CSQA/Norme/Sostenibilita-Ambientale/ISO-14040-LCA [consultato nel 2018].

[154] EnvironDec, *Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (EPD),* https://www.environdec.com/it/ [consultato nel 2018].

[155] EPD Italy, *EPD – La Dischiarazione Ambientale di Prodotto*, http://www.epditaly.it/epd-2/ [consultato nel 2018].

[156] Etichetta ambientale, http://www.etichettaambientale.it/lca.html [consultato nel 2018].

[157] Hydrogen Tools, *Lower and Higher Heating Values of Fuels*, https://h2tools.org/hyarc/calculator-tools/lower-and-higher-heating-values-fuels [consultato nel 2018].

[158] IEA, *World Energy Outlook - The gold standard of energy analysis*, https://www.iea.org/weo/ [consultato nel 2018].

[159] ISPRA, *Dichiarazione Ambientale di Prodotto (DAP),* http://www.isprambiente.gov.it/it/temi/sviluppo-sostenibile/strumenti-per-lo-sviluppo-sostenibile/dichiarazione-ambientale-di-prodotto-dap [consultato nel 2018].

[160] ISPRA, http://www.isprambiente.gov.it/it/certificazioni/ipp/lca [consultato nel 2018].

[161] Wikipedia, *Marchio ecologico*, https://it.wikipedia.org/wiki/Marchio_ecologico [consultato nel 2018].

LIBRI

[162] A. Guadagni (a cura di), *Potere calorifico dei combustibili*, Prontuario dell'ingegnere, sez. Energetica, Ediz. 3°, Manuale Hoepli (2010), pp. 243-244, http://www.manualihoepli.it/media/doc/pr243.pdf

[163] G. L. Baldo*, LCA Life Cycle Assessment. Uno strumento di analisi energetica e ambientale*, Ipaservizi Editore (2000).

[164] R. Giordano*, I prodotti per l'edilizia sostenibile. La compatibilità ambientale dei materiali nei processi edilizi*, Sistemi Editoriali (2010).

LEGGI E NORME

[165] D. Lgs. 19 agosto 2005, n. 192, *Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia*, http://www.camera.it/parlam/leggi/deleghe/05192dl.htm

[166] UNI EN ISO 14020:2002, *Etichette e dichiarazioni ambientali - Principi generali*, http://store.uni.com/catalogo/index.php/uni-en-iso-14020-2002.html

[167] UNI EN ISO 14021:2016, *Etichette e dichiarazioni ambientali - Asserzioni ambientali auto-dichiarate (etichettatura ambientale di Tipo II)*, http://store.uni.com/catalogo/index.php/uni-en-iso-14021-2016.html

[168] UNI EN ISO 14024:2018, *Etichette e dichiarazioni ambientali - Etichettatura ambientale di Tipo I - Principi e procedure*, http://store.uni.com/catalogo/index.php/uni-en-iso-14024-2018.html

[169] UNI EN ISO 14025:2006, *Etichette e dichiarazioni ambientali - Dichiarazioni ambientali di Tipo III - Principi e procedure*, http://store.uni.com/catalogo/index.php/uni-iso-14025-2006.html

[170] UNI EN ISO 14025:2010*, Etichette e dichiarazioni ambientali - Dichiarazioni ambientali di Tipo III - Principi e procedure*, http://store.uni.com/catalogo/index.php/uni-en-iso-14025-2010.html

[171] UNI EN ISO 14040:2006, *Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento*, http://store.uni.com/catalogo/index.php/uni-en-iso-14040-2006.html

[172] UNI EN ISO 14044:2006, *Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida*, http://store.uni.com/catalogo/index.php/uni-en-iso-14044-2006.html

[173] UNI EN ISO 14044:2018, *Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida*, http://store.uni.com/catalogo/index.php/uni-en-iso-14044-2018.html