



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

---

Corso di Laurea Triennale in  
**Ingegneria Civile e Ambientale**

**RECUPERO DI RIFIUTI NON PERICOLOSI E  
SOTTOPRODOTTI INDUSTRIALI:  
SCENARIO NAZIONALE E INTERNAZIONALE  
E APPLICAZIONI INNOVATIVE**

**NON-HAZARDOUS WASTES AND  
INDUSTRIAL BY-PRODUCTS RECOVERY:  
NATIONAL AND INTERNATIONAL SCENARIO  
AND INNOVATIVE APPLICATIONS**

Laureando:  
**Salvì Piccirilli**

Relatore:  
**Prof. Ing. Anna Laura Eusebi**

Correlatore:  
**Prof. Francesco Fatone**



## INDICE

<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>1</b>
<b>I RIFIUTI: QUANTITA' E PRODUZIONI INQUADRAMENTO NAZIONALE ED EUROPEO.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 QUADRO EUROPEO.....</b>	<b>3</b>
1.1.1 PRODUZIONE TOTALE DI RIFIUTI.....	3
1.1.2 TRATTAMENTO DEI RIFIUTI .....	9
<b>1.2 QUADRO NAZIONALE .....</b>	<b>12</b>
1.2.1 PRODUZIONE TOTALE RIFIUTI SPECIALI .....	12
1.2.2 PRODUZIONE RIFIUTI NON PERICOLOSI.....	13
<b>GESTIONE DEI RIFIUTI E LINEE GUIDA DI ECONOMIA CIRCOLARE .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 ECONOMIA CIRCOLARE .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2 GESTIONE DEI RIFIUTI.....</b>	<b>21</b>
<b>2.3 PRINCIPALI CATENE DI VALORE DEI PRODOTTI.....</b>	<b>24</b>
2.3.1 APPARECCHIATURE ELETTRICHE ED ELETTRONICHE .....	24
2.3.2 BATTERIE E VEICOLI.....	25
2.3.3 IMBALLAGGI E PLASTICA.....	26
2.3.4 PRODOTTI TESSILI .....	28
2.3.5 COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE .....	30
2.3.6 ACQUE E NUTRIENTI.....	32

<b>STATO DELL'ARTE DEL RICICLO E RIUSO: CASI STUDIO INNOVATIVI NEL CONTESTO EUROPEO.....</b>	<b>38</b>
<b>3.1 TECNICHE EMERGENTI DI RECUPERO/RICICLO .....</b>	<b>40</b>
3.1.1 ANALISI ONLINE XRF .....	40
3.1.2 ABBATTIMENTO DI VOC MEDIANTE IONIZZAZIONE E ADSORBIMENTO SU CARBONE ATTIVO .....	42
3.1.4 DIGESTIONE ANAEROBICA SECCA DEI RIFIUTI DOMESTICI ORGANICI .....	48
<b>3.2 PROGETTI E CASI STUDIO EUROPEI.....</b>	<b>52</b>
3.2.1 LCA DEI RIFIUTI DI COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE.....	58
3.2.2 MATERIE E METODI DI RECUPERO .....	61
3.2.2.1 AGGREGATI.....	62
3.2.2.2 PLASTICA .....	65
3.2.2.3 LEGNO.....	68
3.2.2.4 MATERIALI CERAMICI.....	70
3.3.3 CAMPI DI APPLICAZIONE E CONTESTI DI RIUTILIZZO .....	72
3.3.3.1 CALCESTRUZZO.....	75
3.3.3.2 PRODOTTI DERIVATI DAL LEGNO.....	75
3.3.3.3 SVILUPPO DI ELEMENTI ISOLANTI IN CDW .....	77
3.3.3.4 PAVIMENTAZIONI E RIVESTIMENTI .....	78
3.3.3.5 TEST PILOTA.....	80
<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>82</b>
<b>BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....</b>	<b>85</b>

## INTRODUZIONE

I rifiuti, definiti dalla direttiva 2008/98/CE [1] (articolo 3, paragrafo 1) come "qualsiasi sostanza od oggetto di cui il detentore si disfi o abbia l'intenzione o l'obbligo di disfarsi", rappresentano potenzialmente un enorme sperpero di risorse sotto forma sia di energia sia di materiali. Inoltre, la loro gestione e smaltimento possono avere un forte impatto ambientale.

Le discariche ad esempio occupano spazio e possono provocare inquinamento del suolo, dell'acqua e dell'aria, mentre l'incenerimento può diventare fonte di emissione di inquinanti atmosferico.

È costantemente registrato un aumento della domanda di materie prime e allo stesso tempo una scarsità delle risorse: molte delle materie prime e delle risorse essenziali per l'economia sono limitate, ma la popolazione mondiale continua a crescere e di conseguenza aumenta anche la richiesta di tali risorse finite [5].

Le politiche UE di gestione dei rifiuti mirano pertanto a ridurre l'impatto dei rifiuti sull'ambiente e sulla salute e a promuovere l'uso efficiente delle risorse attraverso un'economia circolare.

L'obiettivo a lungo termine di tali politiche è la riduzione dei quantitativi di rifiuti prodotti e, allorché la loro produzione è inevitabile, la promozione dei rifiuti come risorsa e il conseguimento di livelli più elevati di riciclaggio e uno smaltimento dei rifiuti sicuro.

Lo scopo della tesi è analizzare questa problematica e documentare le grandi potenzialità che lo smaltimento dei rifiuti offre da un punto di vista ambientale, economico e sociale mediante lo sviluppo di nuove tecnologie atte a migliorare la gestione, il recupero e il riutilizzo delle cosiddette materie prime secondarie. Lo scenario verrà descritto con evidenze specifiche desunte da studi di letteratura e da casi studio nazionali ed europei.

# CAPITOLO I

## I RIFIUTI: QUANTITA' E PRODUZIONI INQUADRAMENTO NAZIONALE ED EUROPEO

### 1.1 QUADRO EUROPEO

In questo capitolo verranno analizzati e commentati i principali dati statistici nazionali ed internazionali sulla produzione dei rifiuti forniti da Eurostat e Ispra [2,3]. L'obiettivo è quello di individuare i tratti caratteristici, le problematiche e le risorse comuni che influenzano l'andamento del quadro globale.

#### 1.1.1 PRODUZIONE TOTALE DI RIFIUTI

Nel 2016, la produzione totale di rifiuti delle attività economiche e domestiche nell' UE-28 ammontava a 2 507 milioni di tonnellate [2].

Tale dato costituisce l'importo più elevato registrato nell'UE-28 nel periodo 2004-2016.

Come prevedibile, il quantitativo totale di rifiuti prodotti è in una certa misura legato alla dimensione demografica ed economica di un paese.

Come risulta dal Grafico 1.1, gli Stati membri più piccoli dell'UE hanno generalmente registrato i livelli più bassi di produzione di rifiuti, i paesi più grandi quelli più elevati.

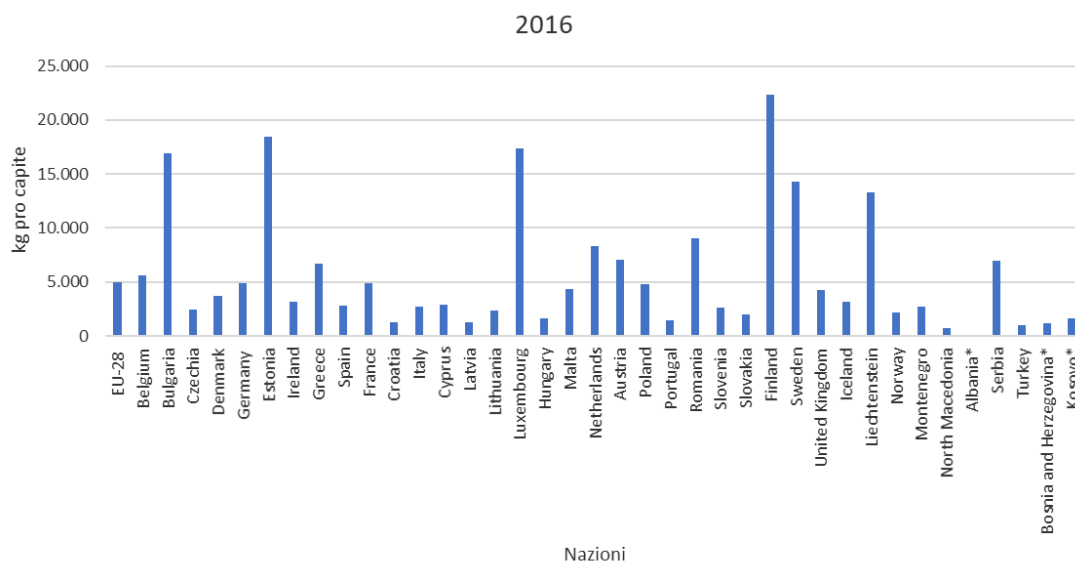


Grafico 1.1 - Produzione di rifiuti totali kg pro capite, anno 2016;

\* Kosovo (under United Nations Security Council Resolution 1244/99)

\*Bosnia and Herzegovina i dati sono riferiti al 2012

\*Albania non ha dati statistici

Fonte: Eurostat (env\_wasgen) [4]

Si possono chiaramente constatare i livelli elevati di rifiuti generati in alcuni degli Stati membri più piccoli dell'UE, con un dato particolarmente alto per Bulgaria, Estonia, Finlandia, Lussemburgo dove nel 2016 il tasso di rifiuti per abitante era molto più elevato rispetto alla media di 4,9 tonnellate per abitante dell'UE-2.

La quota delle diverse attività economiche e domestiche sulla produzione totale di rifiuti per il 2014 è illustrata al grafico 1.2.



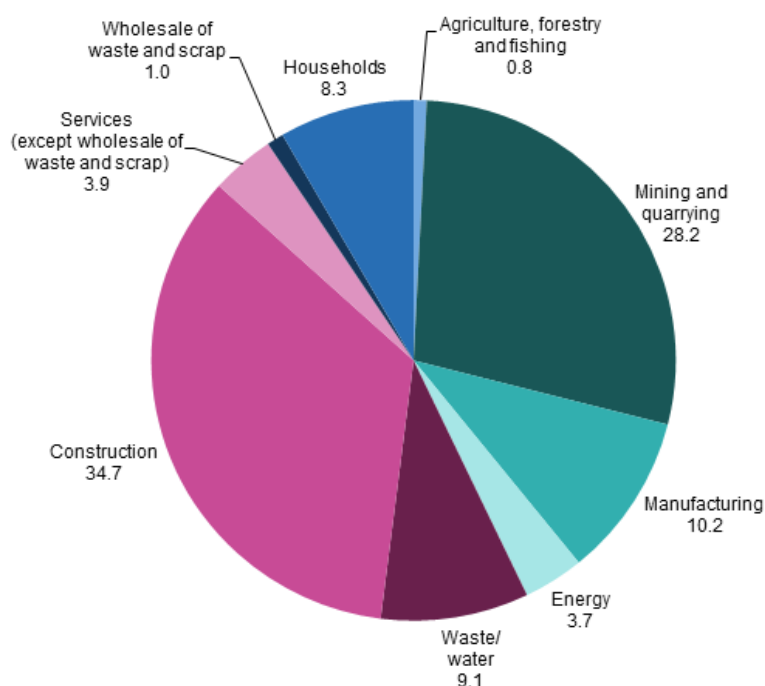


Grafico 1.2 - Produzione di rifiuti delle attività economiche e domestiche, UE-28, 2014(%);  
Fonte; Eurostat (env\_wasgen) [4]

Nell'UE-28, il settore delle costruzioni ha contribuito per il 34,7% del totale, seguito dalle attività estrattive (28,2%), dalle attività manifatturiere (10,2%), dai servizi nel settore delle acque e dei rifiuti (9,1%) e dalle attività domestiche (8,3%); il restante 9,5% dei rifiuti è stato generato da altre attività economiche, principalmente i servizi (3,9%) e l'energia (3,7%).

Nel 2014 nell'UE-28 sono stati prodotti 891 milioni di tonnellate di rifiuti, esclusi i principali rifiuti minerali, equivalenti al 35% della produzione totale (cfr. Grafico 1.3).

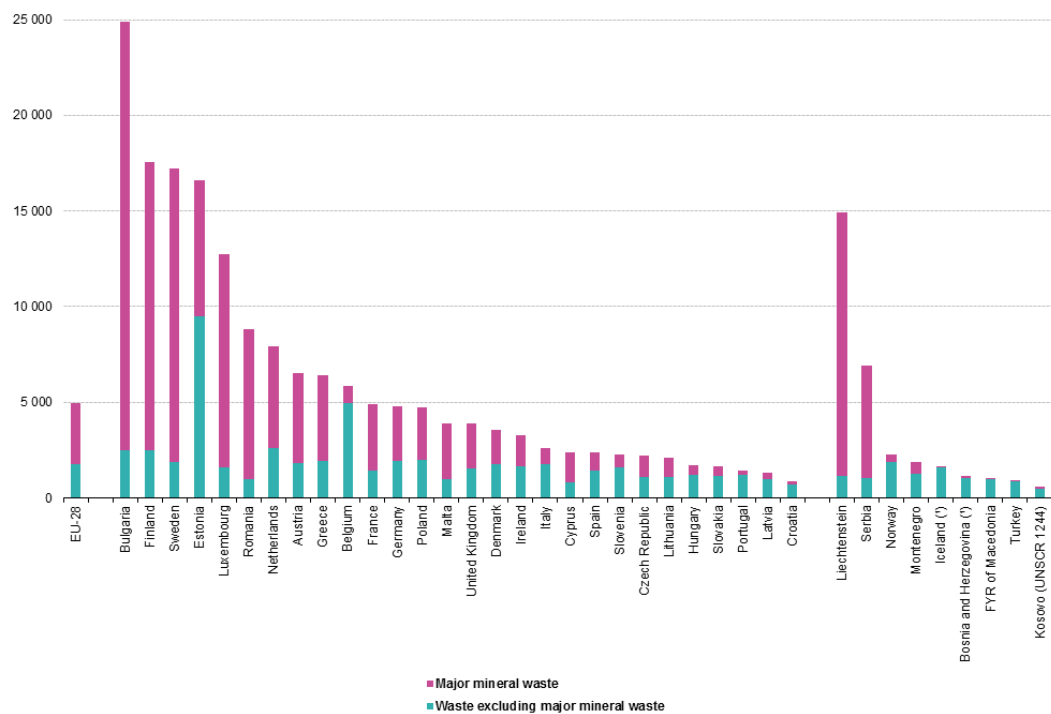


Grafico 1.3 - Produzione di rifiuti, 2014 (kg per abitante);  
 \*Dati riferiti al 2012  
 Fonte: Eurostat (env\_wasgen) [4]

Se si rapportano tali dati alla popolazione, risulta che nel 2014 ciascun abitante dell'UE-28 ha prodotto in media 1,8 tonnellate di rifiuti.

Mentre il livello complessivo dei rifiuti è diminuito del 5,3% tra il 2004 e il 2014, il quantitativo per abitante è sceso dell'8,0% (in quanto anche la popolazione dell'UE è aumentata nel corso di questo periodo).

Il grafico 3 illustra un'analisi della quantità di rifiuti generati in forma standardizzata, rapportata alla dimensione della popolazione.

Diversi Stati membri tra quelli che hanno registrato livelli particolarmente alti di rifiuti prodotti per abitante presentano quote molto elevate di rifiuti

riconducibili alle attività estrattive, mentre in altri paesi le attività di costruzione e di demolizione hanno spesso contribuito a tali dati elevati.

Molti rifiuti provenienti dalle attività estrattive e dalle attività di costruzione e demolizione sono classificati come principali rifiuti minerali: l'analisi presentata nel grafico 3 distingue i principali rifiuti minerali dagli altri rifiuti. Quasi due terzi (64% o 3,2 tonnellate per abitante) della produzione totale di rifiuti nell'UE-28 nel 2014 erano costituiti dai principali rifiuti minerali.

La quota relativa di principali rifiuti minerali sul totale dei rifiuti prodotti ha registrato forti variazioni tra gli Stati membri dell'UE, forse riconducibili, almeno in una certa misura, alle differenti strutture economiche.

In generale, gli Stati membri UE con un tasso più elevato dei principali rifiuti minerali erano quelli caratterizzati da una quota relativamente significativa di attività estrattive, quali Bulgaria, Svezia, Romania e Finlandia, e/o di attività di costruzione e demolizione, ad esempio il Lussemburgo.

In questi Stati membri i principali rifiuti minerali costituivano almeno l'85% del totale di rifiuti prodotti, come già nel caso di Liechtenstein e Serbia.

I principali rifiuti minerali costituivano meno di un quinto di tutti i rifiuti prodotti in Croazia, Portogallo e Belgio, così come in Norvegia, Turchia, Bosnia-Erzegovina (dati del 2012), nell'ex Repubblica jugoslava di Macedonia e in Islanda (dati del 2012).

	2004	2006	2008	2010	2012	2014	Rate of change 2004-2014 (%)
	(million tonnes)						
<b>Total</b>	941.1	942.3	903.4	875.2	884.2	890.8	-5.3
Agriculture, forestry and fishing	63.1	57.4	46.2	21.7	22.3	19.7	-68.7
Mining and quarrying	10.4	7.1	10.1	8.0	7.8	7.9	-24.1
<b>Manufacturing</b>	271.4	250.5	236.6	202.8	190.5	184.1	-32.2
Energy	92.2	100.0	88.8	81.9	93.6	90.7	-1.6
Waste/water	110.9	110.2	130.1	149.0	178.7	208.0	87.7
Construction	39.3	45.2	38.7	50.9	60.1	61.8	57.2
Other sectors	148.8	160.9	140.6	146.5	122.0	115.0	-22.7
Households	205.0	211.0	212.3	214.4	209.3	203.5	-0.7

Tavola 1.1 - Produzione di rifiuti, esclusi i principali rifiuti minerali, UE-28, 2004-2014

Fonte: Eurostat (env\_wasgen) [4]

La tavola 1.1 mostra l'evoluzione della produzione di rifiuti nell'UE-28, esclusi i principali rifiuti minerali, per attività economica.

Nel 2014 i maggiori livelli di produzione di rifiuti sono stati registrati per i servizi nel settore delle acque e dei rifiuti, per le attività domestiche e per quelle manifatturiere (208 milioni di tonnellate, 204 milioni di tonnellate e 184 milioni di tonnellate).

La loro evoluzione ha seguito un diverso andamento nel corso del tempo: la produzione di rifiuti generati dai servizi nel settore delle acque e dei rifiuti è aumentata dell'87,7% tra il 2004 e il 2014.

Il quantitativo di rifiuti generato dal settore delle costruzioni è anch'esso cresciuto rapidamente (con un aumento complessivo del 57,2 % durante il periodo in considerazione).

Al contempo, la produzione di rifiuti derivanti dalle attività domestiche e dal settore dell'energia è rimasta alquanto stabile.

I rifiuti prodotti da agricoltura, silvicoltura e pesca sono diminuiti del 68,7%, quelli risultanti dalle attività manifatturiere del 32,2%.

Similmente, è stata registrata una notevole diminuzione, pari a quasi un quarto, del quantitativo di rifiuti derivanti dalle attività estrattive da altri settori (24,1 % e 22,7 % rispettivamente).

### 1.1.2 TRATTAMENTO DEI RIFIUTI

Nel 2014 nell'UE-28 sono stati trattati circa 2.320 milioni di tonnellate di rifiuti (cfr. grafico 1.4). Tale dato comprende i rifiuti importati nell'UE e pertanto i quantitativi riportati non sono direttamente comparabili con quelli registrati sulla produzione di rifiuti [4].

La produzione di rifiuti riciclabili, tuttavia, è un fattore importante in quanto garantire la riciclabilità significa garantire un percorso di vita del materiale molto più lungo. Infatti, questo, non essendo più destinato in discarica non viene considerato un "rifiuto classico" ma una materia prima secondaria che può essere usata per scopi nuovi rispetto al prodotto iniziale o medesimi.

Quasi la metà (47,4%) dei rifiuti trattati nell'UE-28 nel 2014 è stata sottoposta a operazioni di smaltimento diverse dall'incenerimento (collocamento in discarica).

Un altro 36,2% dei rifiuti trattati nell'UE-28 nel 2014 è stato destinato a operazioni di recupero, diverse dal recupero energetico e dalla colmatazione (per semplificazione indicati come riciclaggio).

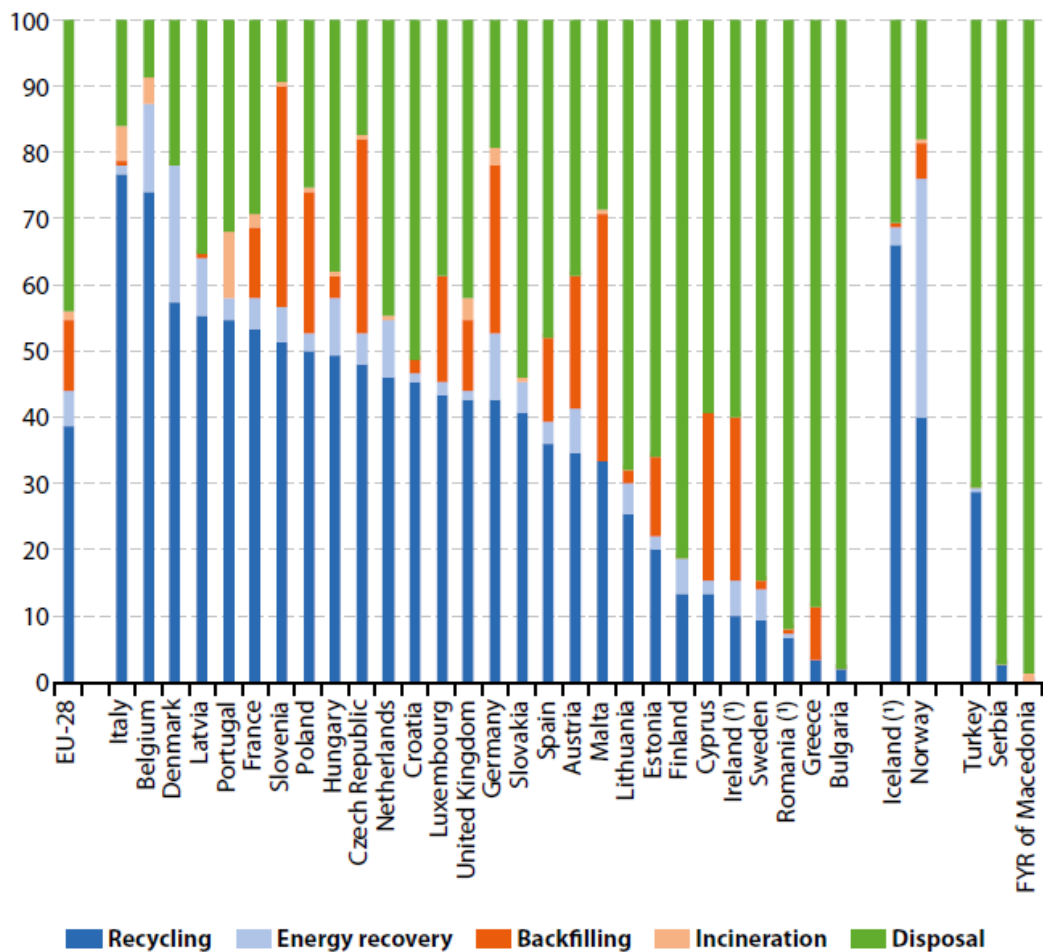


Grafico 1.4 - Trattamento dei rifiuti (%), 2014)

(1) 2012

Fonte: Eurostat (env\_wastrt) [4]

Poco più di un decimo (10,2%) dei rifiuti trattati nell'UE-28 è stato destinato alla colmatazione (l'uso di rifiuti in aree scavate per finalità collegate al risanamento di scarpate, alla messa in sicurezza oppure a interventi paesaggistici), mentre il resto è stato avviato all'incenerimento, sia con recupero energetico (4,7%) che senza (1,5%).

Tra gli Stati membri dell'UE sono state registrate differenze significative per quanto riguarda l'uso dei diversi metodi di trattamento.

Ad esempio, alcuni Stati membri presentavano percentuali molto elevate di riciclaggio (Italia e Belgio), mentre altri prediligevano il collocamento dei rifiuti in discarica (Bulgaria, Romania, Grecia, Svezia e Finlandia).

Il grafico 1.4 illustra l'evoluzione del trattamento dei rifiuti nell'UE-28 per ciascuna delle grandi categorie di trattamento nel periodo tra il 2004 e il 2014. Il volume dei rifiuti sottoposti a smaltimento nel 2014 è diminuito dell'1,7% rispetto al 2004 e di conseguenza la relativa quota sul totale dei rifiuti trattati è scesa dal 54,6% al 48,9%.



Grafico 1.4 - Evoluzione del trattamento dei rifiuti, UE-28, 2004-2014(2004 = 100)

Fonte: Eurostat (env\_wastrt) [4]

Il volume dei rifiuti recuperati ovvero sottoposti a incenerimento con recupero energetico, riciclati o utilizzati per le operazioni di colmatazione è cresciuto del 23,4 %, passando da 960 milioni di tonnellate nel 2004 a 1 185 milioni di tonnellate nel 2014; di conseguenza, la quota dei rifiuti recuperati sul totale dei rifiuti trattati è salita dal 45,4 % nel 2004 al 51,1 % nel 2014.

## **1.2 QUADRO NAZIONALE**

### 1.2.1 PRODUZIONE TOTALE RIFIUTI SPECIALI

La produzione nazionale dei rifiuti speciali, nel 2017, si attesta a 138,9 milioni di tonnellate (grafico 1.5). Il dato complessivo tiene conto sia dei quantitativi derivanti dalle elaborazioni delle banche dati MUD che di quelli stimati. Sono, inoltre, compresi i quantitativi di rifiuti speciali provenienti dal trattamento dei rifiuti urbani, pari a circa 10,9 milioni di tonnellate [3].

La produzione dei rifiuti speciali non pericolosi risulta pari a circa 68,6 milioni di tonnellate (cfr. grafico 1.5). A questi vanno aggiunti oltre 4 milioni di tonnellate relativi alle stime effettuate per il settore manifatturiero e per quello sanitario, 468 mila tonnellate relative agli pneumatici fuori uso e circa 56,1 milioni di tonnellate di rifiuti delle operazioni di costruzione e demolizione (C&D), interamente stimati, per una produzione totale di



rifiuti speciali non pericolosi pari a oltre 129,2 milioni di tonnellate, incluse poco più di 3 mila tonnellate di rifiuti con attività ISTAT non determinate.

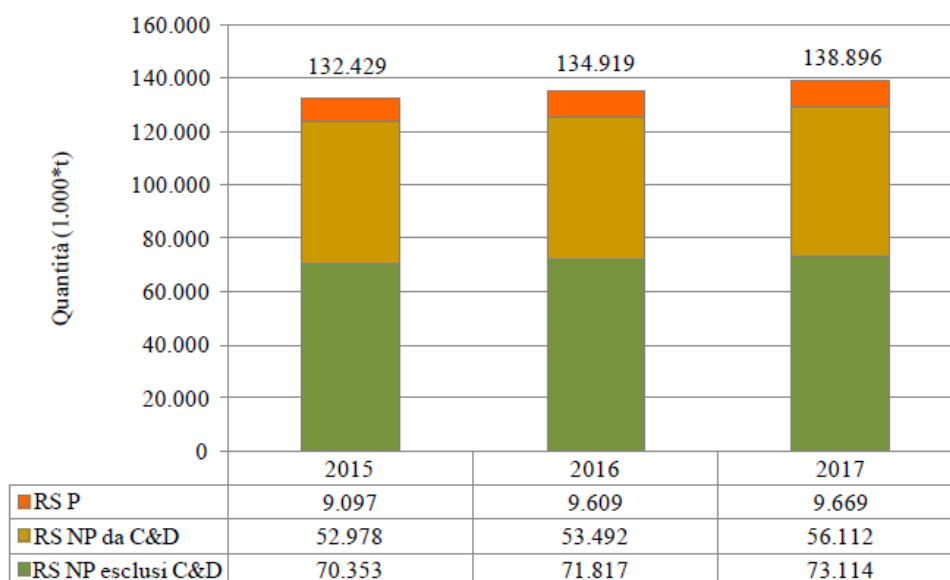


Grafico 1.5 – Produzione nazionale di rifiuti speciali, anni 2015 – 2017;  
Fonte: ISPRA [3]

### 1.2.2 PRODUZIONE RIFIUTI NON PERICOLOSI

Per i rifiuti non pericolosi, la quota stimata rappresenta il 46,9% del totale prodotto (43,6% della quantità complessiva dei rifiuti speciali), soprattutto per effetto del rilevante contributo dei rifiuti generati dalle attività di costruzione e demolizione (cfr. grafico 6).

Relativamente ai soli rifiuti speciali non pericolosi la ripartizione percentuale tra le diverse attività riflette la distribuzione dei dati di

produzione totale, come ipotizzabile data l'elevata incidenza di tale tipologia di rifiuti (93% del quantitativo complessivo).

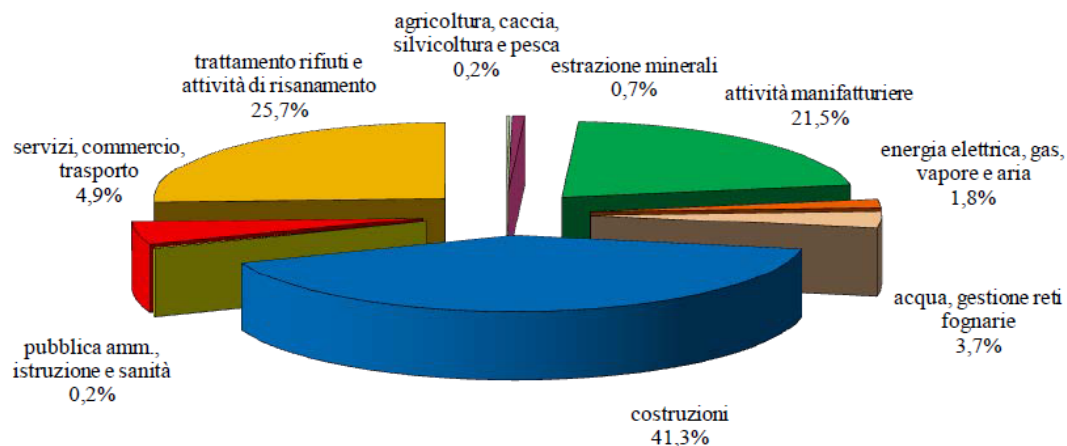


Grafico 1.6 - Ripartizione della produzione dei rifiuti speciali non pericolosi per attività economica (%), anno 2017;

Fonte: ISPRA [3]

Nel 2017, la maggiore produzione di rifiuti speciali non pericolosi deriva dal settore delle costruzioni e demolizioni con una percentuale pari al 44,1% del totale prodotto, corrispondente a 57 milioni di tonnellate. Seguono le attività di trattamento di rifiuti e di risanamento (25,5%) e quelle manifatturiere (20,1%), corrispondenti in termini quantitativi, rispettivamente, a 32,9 milioni di tonnellate comprensive dei quantitativi di rifiuti derivanti dal trattamento dei rifiuti urbani, e a 26 milioni di tonnellate. Alle restanti attività, prese nel loro insieme, corrisponde il 10,3% del totale di rifiuti non pericolosi prodotti (oltre 13,2 milioni di tonnellate).

## **CAPITOLO II**

### **GESTIONE DEI RIFIUTI E LINEE GUIDA DI ECONOMIA CIRCOLARE**

Gli attuali modelli di attività economica lineare dipendono da una produzione permanente di materiali che vengono estratti, scambiati, trasformati in merci e infine smaltiti come rifiuti o emissioni (Grafico 2.1).

Tra il 1970 e il 2017, l'estrazione globale annuale di questi materiali è più che triplicata, passando da 27 a 92 miliardi di tonnellate.

Dal 2000, i tassi di estrazione hanno accelerato, crescendo del 3,2% all'anno. Ciò è in gran parte guidato da importanti investimenti infrastrutturali e standard di vita più elevati nei paesi in via di sviluppo e in transizione, in particolare in Asia [5].

Si prevede che la popolazione globale passerà da 7,5 miliardi di persone nel 2017 a 10,2 miliardi di persone entro il 2060, gli standard di vita continueranno ad aumentare in tutti i paesi e convergeranno gradualmente verso quelli dei paesi più avanzati (OSCE). Il previsto aumento della popolazione e dei livelli di reddito pro capite globali si tradurrebbe in un valore più che triplicato del PIL globale [6].

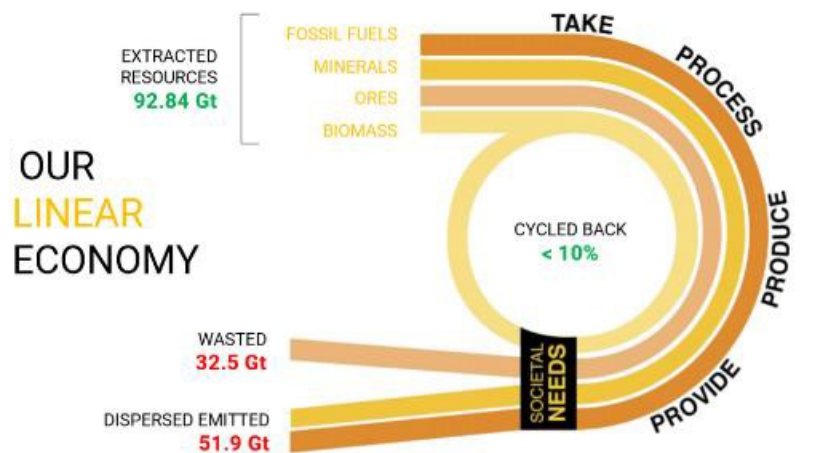


Grafico 2.1 - Modelli attuali di attività economica lineare

Fonte: UNEP (2019), *Advancing Sustainable Consumption & Production* [5]

L'ascesa della classe media nelle economie emergenti e nei paesi in via di sviluppo, insieme alla rapida urbanizzazione, dovrebbe avere un forte impatto sull'ambiente, aggravare i cambiamenti climatici, aumentare l'esposizione ai cambiamenti climatici e ai rischi di catastrofi e intensificare la concorrenza per alcune materie prime.

Questa scala di crescita nell'uso delle risorse materiali (senza miglioramenti nella gestione degli impatti legati alla loro estrazione, coltivazione, rigenerazione, uso e smaltimento) comporterebbe un notevole stress aggiuntivo sui sistemi di approvvigionamento delle risorse e una pressione ambientale senza precedenti. L'estrazione e la trasformazione delle risorse sono all'origine della metà delle emissioni totali di gas a effetto serra e di oltre il 90 % della perdita di biodiversità e dello stress idrico (Grafico 2.2).

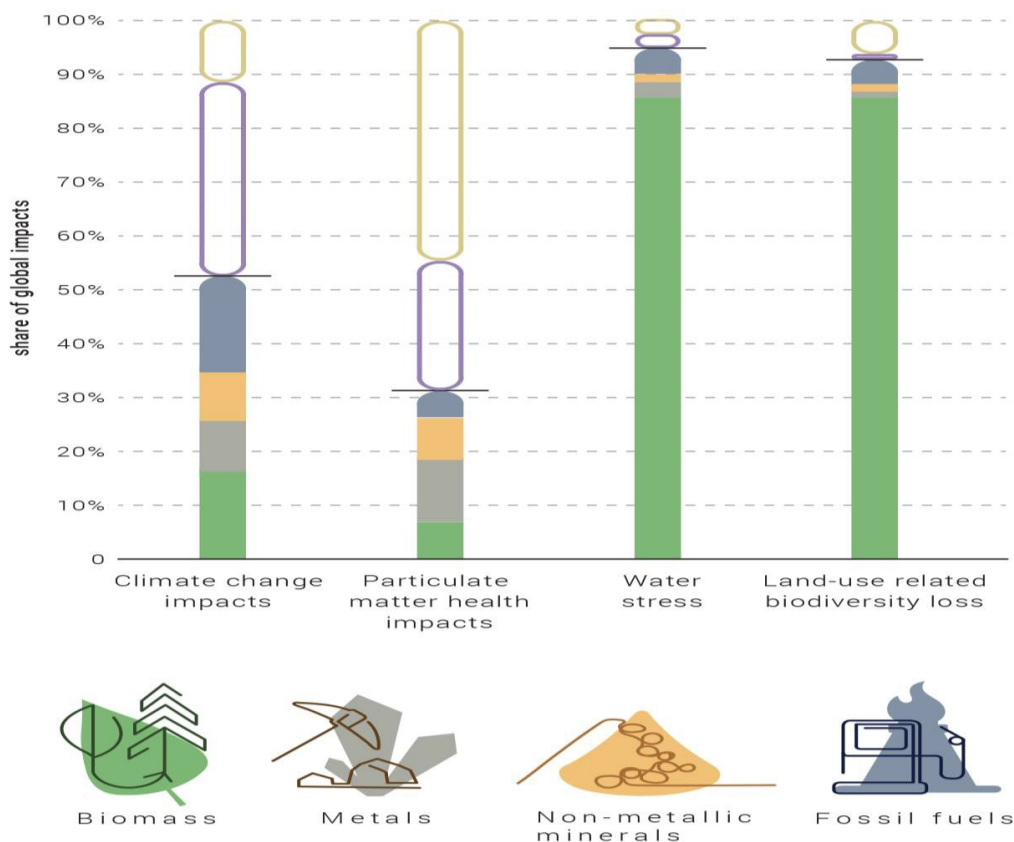


Grafico 2.2 - Impatti globali suddivisi per tipo di risorsa materiale  
 Fonte: IRP, Global Resources Outlook 2019 [5]

Osservando l'estrazione e l'elaborazione (non le fasi di utilizzo e smaltimento) di ciascun tipo di risorsa materiale, risulta che a livello globale:

- La coltivazione e la lavorazione della biomassa (per alimenti, materie prime ed energia) sono ora responsabili di quasi il 90% dello stress idrico globale e della perdita di biodiversità legata all'uso del suolo e di oltre il 30% delle emissioni di gas a effetto serra legate alle risorse (escluse le emissioni dal cambio di uso del suolo).

- Tra il 2000 e il 2015, i cambiamenti climatici e gli impatti sulla salute derivanti dall'estrazione e dalla produzione globale di metalli sono quasi raddoppiati. Tra i metalli, la catena di produzione globale ferro-acciaio provoca il maggiore impatto sul cambiamento climatico e rappresenta circa un quarto della domanda globale di energia industriale.
- La maggior parte degli impatti relativi ai minerali non metallici si verificano nella fase di lavorazione e la produzione di clinker (l'ingrediente principale del cemento).

## **2.1 ECONOMIA CIRCOLARE**

Quando si parla di “fine vita” dei prodotti è fondamentale approfondire il concetto, le definizioni, le tipologie di scarto (o rifiuto) rinvenibili nelle varie fasi del ciclo di vita del prodotto. Tale approfondimento ha come corollario riflessioni sul tema della “riduzione degli sprechi”, e quindi sull’analisi di alcuni modelli, metodi e strategie in grado di rendere virtuoso il fine vita attraverso interventi di riciclo, riduzione, riuso degli scarti.

L'European Green Deal è la nuova strategia Europea per un'economia climaticamente neutra, efficiente sotto il profilo delle risorse e competitiva. Prevede una serie di azioni volte a promuovere l'uso efficiente delle risorse

passando a un'economia pulita e circolare, ripristinando la biodiversità e riducendo l'inquinamento.

L'obiettivo è di raggiungere la neutralità climatica entro il 2050 e dissociare la crescita economica dall'uso delle risorse estrattive [7].

Per concretizzare questa ambizione, l'UE punta ad accelerare la transizione verso un modello di crescita rigenerativo che restituisca al pianeta più di quanto prenda, adoperandosi a favore del mantenimento del consumo di risorse entro i limiti del pianeta, e dunque ridurre la sua impronta dei consumi e raddoppiare la percentuale di utilizzo dei materiali circolari nel prossimo decennio.

Il piano sull'economia circolare stabilisce un programma orientato al futuro per costruire un'Europa più pulita e competitiva in co-creazione con gli operatori economici, i consumatori, i cittadini e le organizzazioni della società civile [7].

Le iniziative e la legislazione dell'UE trattano già in parte gli aspetti relativi alla sostenibilità dei prodotti ma di fatto, non esiste un insieme esaustivo di prescrizioni per garantire che tutti i prodotti immessi sul mercato dell'UE diventino via via più sostenibili e soddisfino i criteri dell'economia circolare.

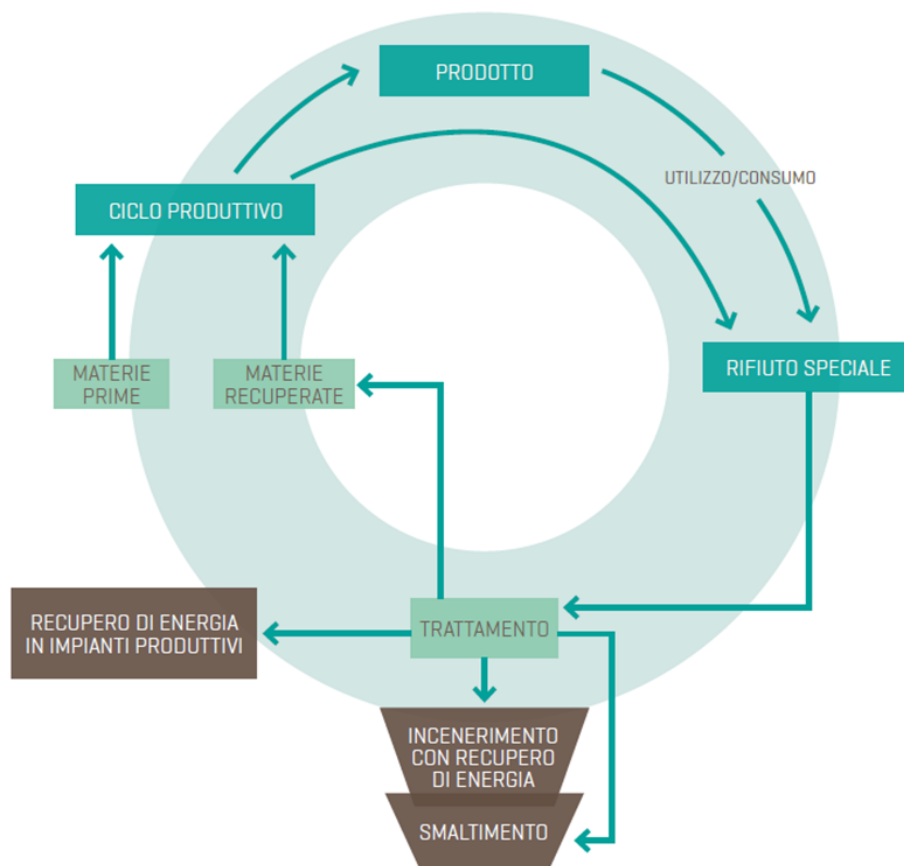


Grafico 2.3 schema esemplificativo del ciclo di gestione dei rifiuti

Fonte: ISPRA [3]

Per rendere i prodotti idonei a un'economia neutra dal punto di vista climatico, efficiente sotto il profilo delle risorse e circolare, ridurre i rifiuti e garantire che le prestazioni dei precursori della sostenibilità diventino progressivamente la norma, c'è bisogno di una strategia in materia di prodotti sostenibili attraverso l'estensione della direttiva riguardante la progettazione ecocompatibile [9] al di là dei prodotti connessi all'energia, in



modo che il quadro della progettazione ecocompatibile possa applicarsi alla più ampia gamma possibile di prodotti e rispetti i principi della circolarità.

I principi di sostenibilità su cui si basa l'economia circolare prevedono [7]:

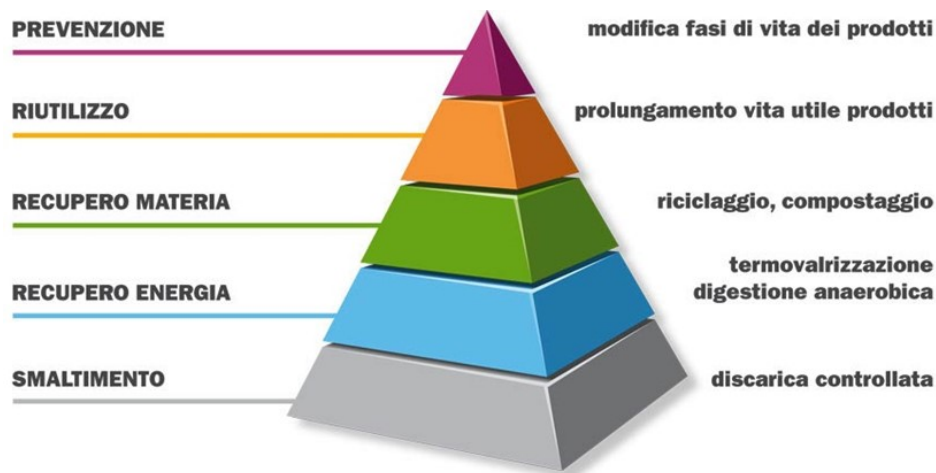
- il miglioramento della durabilità, della riutilizzabilità, della possibilità di upgrading e della riparabilità dei prodotti, la questione della presenza di sostanze chimiche pericolose nei prodotti e l'aumento della loro efficienza sotto il profilo energetico e delle risorse;
- l'aumento del contenuto riciclato nei prodotti, garantendone al tempo stesso le prestazioni e la sicurezza;
- la possibilità di rifabbricazione e di riciclaggio di elevata qualità;
- la riduzione delle impronte carbonio e ambientale;
- la limitazione dei prodotti monouso e la lotta contro l'obsolescenza prematura;
- l'introduzione del divieto di distruggere i beni durevoli non venduti;
- la promozione del modello "prodotto come servizio".

## **2.2 GESTIONE DEI RIFIUTI**

La gestione adeguata dei rifiuti è un elemento essenziale per garantire l'efficienza delle risorse e la crescita sostenibile delle economie europee.

La direttiva quadro sui rifiuti riveduta del 2008 [1] ha pertanto introdotto una gerarchia dei rifiuti in cinque fasi che dà la priorità alla prevenzione, seguita dal riutilizzo, dal riciclaggio e da altre modalità di recupero.

Lo smaltimento in discarica è l'ultima risorsa.



*Grafico 2.4 Gerarchia dei rifiuti;  
Fonte: ISPRA [3]*

In linea con questa gerarchia dei rifiuti, il settimo programma di azione in materia di ambiente [8] individua i seguenti obiettivi prioritari per la politica in tema di rifiuti nell'UE:

- ridurre i quantitativi di rifiuti prodotti;
- aumentare al massimo il riciclaggio e il riutilizzo;
- limitare l'incenerimento ai materiali non riciclabili;
- eliminare progressivamente il collocamento in discarica dei rifiuti non riciclabili e non recuperabili;
- garantire la piena attuazione degli obiettivi nella politica in tema di rifiuti in tutti gli Stati membri dell'UE.

Inoltre, il settore della gestione dei rifiuti è per importanza il secondo motore di crescita dell'occupazione nell'economia ambientale, come evidenziato dai conti dei beni e dei servizi ambientali.

La direttiva [1] definisce il «riciclaggio» qualsiasi operazione di recupero attraverso cui i materiali di rifiuto sono ritrattati per ottenere prodotti, materiali o sostanze da utilizzare per la loro funzione originaria o per altri fini. Include il ritrattamento di materiale organico ma non il recupero di energia né il ritrattamento per ottenere materiali da utilizzare quali combustibili o in operazioni di riempimento. In particolare, i sottoprodotti sono sostanze od oggetti derivanti da un processo di produzione che non ha come obiettivo primario la loro produzione (non sono rifiuti).

Per “riutilizzo”, invece, si intendono tutte le operazioni che permettono di riutilizzare, per uno stesso scopo, prodotti che non sono ancora diventati rifiuti. Le materie riutilizzabili godono, in genere, di ancora ottime proprietà ai fini di utilizzo e sono accompagnate da trattamenti poco invasivi.

Alcune categorie di rifiuti, come i rifiuti da costruzione e da demolizione, alcune ceneri e scorie, i rottami ferrosi, gli aggregati, gli pneumatici, i rifiuti tessili, i composti, i rifiuti di carta e di vetro, “cessano di essere tali” se soddisfano specifici criteri.

I prodotti secondari sono inerenti a qualsiasi processo industriale e normalmente non possono essere evitati. Inoltre, l'uso di prodotti da parte della società porta a residui. In molti casi, questi tipi di materiali (sia

prodotti secondari che residui) non possono essere riutilizzati con altri mezzi ai fini commerciali ma sono, in genere, dati a terze parti come rifiuti per un ulteriore trattamento.

Il tipo e la natura del rifiuto determina il processo di trattamento e il suo successivo destino.

Nei prossimi capitoli verranno illustrati alcuni nuovi processi di riciclaggio, recupero e riutilizzo. Il focus sarà su prodotti e/o sottoprodotti diversi dalla loro funzione originaria.

## **2.3 PRINCIPALI CATENE DI VALORE DEI PRODOTTI**

Il riciclaggio è il risultato di una serie di processi che fanno parte di una vera e propria catena di valore. In questo paragrafo sono trattati i principali flussi di materiali con potenzialità di riciclo e riutilizzo.

### **2.3.1 APPARECCHIATURE ELETTRICHE ED ELETTRONICHE**

I rifiuti delle apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE) continuano a costituire uno dei flussi di rifiuti in più rapida crescita nell'UE, con un tasso annuale pari attualmente al 2 %. Si stima [10] che nell'UE meno del 40 % dei rifiuti elettronici sia riciclato. Si verifica una perdita di valore quando i prodotti del tutto o in parte funzionanti sono eliminati perché non si possono riparare, il software non è più supportato o i materiali incorporati nei dispositivi non sono recuperati.

I RAEE sono una miscela complessa di materiali e componenti che, a causa della pericolosità del loro contenuto, se non gestito correttamente, può

causare gravi problemi ambientali e di salute. Inoltre, la produzione di elettronica moderna richiede l'uso di scarse e costose risorse.

Circa due cittadini europei su tre vorrebbero poter utilizzare più a lungo i dispositivi digitali che possiedono, purché le prestazioni non siano compromesse in modo significativo [7].

Nazioni	Rifiuti generati (t)	Rifiuti generati (kg/ab)	Riciclaggio e Riutilizzo (t)	Recupero (t)
EU-28	3.789.011	7.44	3.140.569	3.402.962
Italia	363.181	5.98	295.381	304.358

Tabella 2.1 Produzione Rifiuti RAEE anno 2015

Fonte: Eurostat [10]

### 2.3.2 BATTERIE E VEICOLI

Le batterie e i veicoli sostenibili sono alla base della mobilità del futuro.

La direttiva 2000/53/ CE [11] relativa ai veicoli fuori uso è stata istituita allo scopo di fabbricare veicoli con un disinquinamento, smantellamento e riciclaggio più rispettoso dell'ambiente ed economicamente attraente. Inoltre, stabilisce obiettivi chiari per il disinquinamento obbligatorio e quantifica obiettivi per il riutilizzo.

Per progredire rapidamente nel rafforzamento della sostenibilità della catena di valore emergente delle batterie per la mobilità elettrica e

aumentare il potenziale di circolarità di tutte le batterie, la Commissione proporrà un nuovo quadro normativo per le batterie.

Nazioni	Rifiuti generati (t)	Rifiuti triturati (t)	Recupero e Riutilizzo (t)	Recupero e riutilizzo (%)
EU-28	6 149 682	6 354	5 799	91.3

*Tabella 2.2 End-of-life veicoli generate e trattati nel 2014,*

*Fonte: Eurostat [12]*

### 2.3.3 IMBALLAGGI E PLASTICA

La quantità di materiali usati per gli imballaggi è in costante crescita e, nel 2017, i rifiuti di imballaggio in Europa hanno raggiunto il record di 173 kg per abitante, il livello più alto mai registrato . Si prevede che il consumo di plastica raddoppierà nei prossimi 20 anni [7].

Entro il 2030 l'UE punta ad avere tutti gli imballaggi sul mercato riutilizzabili o riciclabili in modo economicamente sostenibile.

Le materie plastiche sono principalmente polimeri organici con diverse composizioni.

Polimeri tipici sono polistirene (PS), polietilene tereftalato (PET), polipropilene (PP), poliuretano (PUR), poliacrilonitrile-butadiene-stirene (ABS), policarbonato (PC), poliammidi (PA), polibutilene tereftalato (PBT), polietilene (PE), polivinilcloruro (PVC), ecc.

I rifiuti di plastica possono essere differenziati in base al loro tipo di utilizzo, come mostrato di seguito.

Settori	Polimeri contenuti nei rifiuti di plastica
Imballaggio	PE, PP, PS, PET, ecc.
Automobilistico	PP PUR, ABS, ecc.
Elettrico	PS, ABS, PP, ecc.
Edilizia + Costruzione	Schiume: PUR, espanso, PS e Mix di PS, ecc. Tubi: PE, PVC, ecc.
Agricoltura	PE

Tabella 2.3 - Rifiuti plastici;

Fonte:

[http://www.pie.pl/materialy/\\_upload/OPINIE/WT\\_BREF\\_09\\_02\\_17/D1\\_WT\\_twgbatis.pdf](http://www.pie.pl/materialy/_upload/OPINIE/WT_BREF_09_02_17/D1_WT_twgbatis.pdf), 2017

### 2.3.4 PRODOTTI TESSILI

Il settore tessile occupa la quarta posizione tra i settori che utilizzano più materie prime e acqua dopo il settore alimentare, l'edilizia abitativa e i trasporti, e la quinta posizione per quanto riguarda le emissioni di gas a effetto serra [13].

Sono due le macrocategorie di prodotto oggetto del trattamento di fine vita. La prima sono i rifiuti tessili che provengono dalla produzione di filati e tessuti, dai processi di confezionamento dei capi di abbigliamento e dal retail.

	<b>Scarti Primari</b>	<b>Scarti secondari</b>
<b>Manifattura Tessile</b>	Residui di produzione Scarti di cucitura Estremità laterali delle bobine Tessuti eliminati Panni e stoffe modello Fibre e filati Tessuti danneggiati Rifiuti chimici e da tintura	Rocche Coni Pallet Contenitori e bidoni di coloranti, tinte e sostanze chimiche Involucri di plastica Cartoni ondulati Rifiuti di carta Risorse energetiche (intangibile)
<b>Manifattura Abbigliamento</b>	Tessuti/Residui Filati per cucire (cucirini) Passamanerie Modelli Ritagli e frammenti	Rocche Coni Pallet Imballaggi per spedizione Rifiuti di carta Sacchi e borse Involucri di plastica

Tabella 2.4 - End-of-life rifiuti tessili;

Fonte: Piano Formativo AV/81/A12 "GREENIES".[13]



La seconda categoria è quella degli scarti tessili provenienti dall'utilizzo domestico. La vita media di un capo di abbigliamento si aggira attorno ai 3 anni, dopo i quali viene gettato via. A volte anche gli abiti non utilizzati vengono buttati in quanto "passati di moda" o non più apprezzati. I rifiuti post-consumo vengono spesso immessi nei circuiti della beneficenza oppure terminano il loro ciclo di vita negli impianti di recupero tessile o in discarica.

In questa schematizzazione, i rifiuti provenienti dalle produzioni manifatturiere vengono in buona parte riciclati e i manufatti difettosi e di seconda scelta sono spesso offerti a prezzi molto bassi oppure venduti per il riciclo. Il problema principale sono i prodotti di post-consumo, come il vestiario, che hanno una vita limitata a causa dell'usura, del danneggiamento e della moda.

Si stima che meno dell'1 % di tutti i prodotti tessili post-consumo nel mondo siano riciclati in nuovi prodotti. Il settore tessile dell'UE, composto prevalentemente da PMI ma il 60 % in valore dei capi di abbigliamento dell'UE è prodotto altrove.

Data la complessità della catena di valore del settore tessile l'UE mira a rafforzare la competitività e l'innovazione nel settore, promuovendo il mercato dei prodotti tessili sostenibili e circolari, compreso il mercato per il riutilizzo dei tessili, lottando contro la fast fashion e promuovendo nuovi modelli commerciali.

### 2.3.5 COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE

Nel 2016 sono stati generati circa 374 milioni di tonnellate di rifiuti da costruzione e demolizione (C&DW) [12], ovvero il più grande flusso di rifiuti in peso nell'UE.

La costruzione e la demolizione sono definite come area prioritaria nell'UE secondo il piano d'azione per l'economia circolare (CE 2015 [30]) per la chiusura del ciclo produttivo, mentre la maggior parte dei paesi raggiunge già l'obiettivo della direttiva quadro sui rifiuti per il recupero del 70% di C&DW non pericolosi entro il 2020 (direttiva quadro 2008/98 / CE[15]). Lussemburgo, Malta e Paesi Bassi hanno riportato tassi di recupero del 100% nel 2016.

Nonostante gli alti tassi di recupero, il flusso di C&DW è spesso in “downcycled”.

Il grafico 2.1 mostra le percentuali dei diversi metodi di trattamento di rifiuti minerali C&DW nel 2016: riciclaggio, riempimento, recupero di energia, incenerimento senza recupero di energia, discarica.

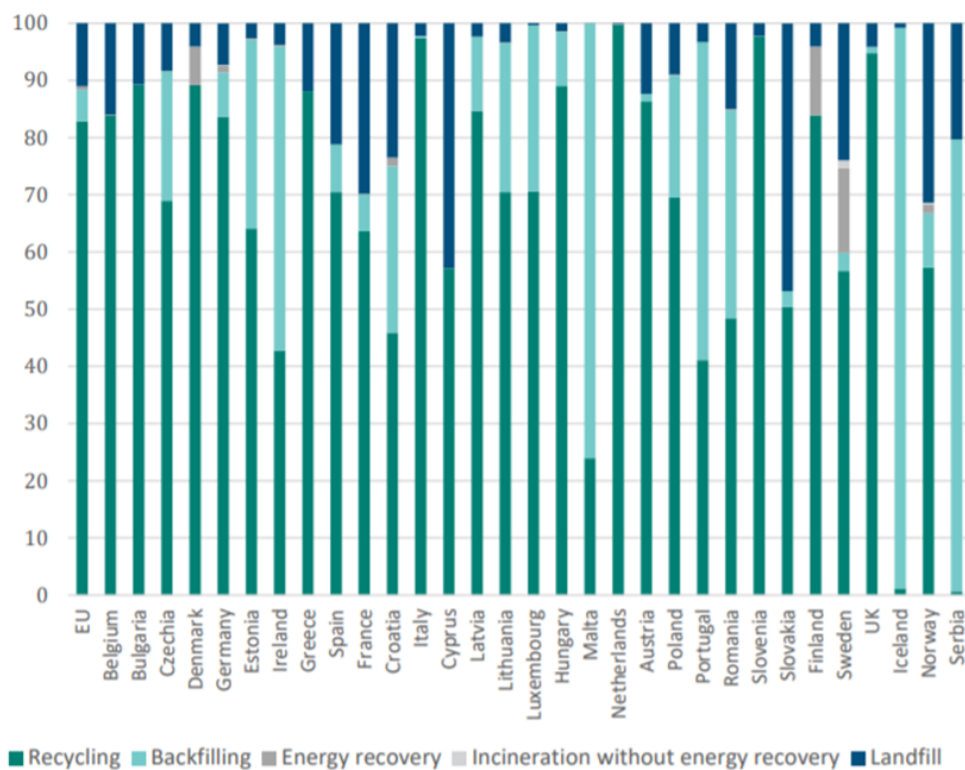


Grafico 2.1 - Trattamento dei rifiuti minerali derivanti da costruzioni e demolizioni (%).

Fonte: EEA, 2016 [14]

L'azione circolare ispirata all'economia nell'ambiente delle costruzioni può direttamente contribuire ad aumentare la prevenzione, il riutilizzo e il riciclaggio: le materie prime non vengono estratte dai loro cicli, ma rimangono nell'economia per il più a lungo possibile attraverso il loro uso efficiente e intelligente.

Il loro valore viene preservato ottimizzando il riutilizzo o il riciclaggio di alto livello. Questo significa che edifici ed elementi costruttivi in fase di progettazione possono essere facilmente adattabili e/o smantellabili riducendo al minimo la demolizione. Inoltre, è importante ampliare la

portata dell'azione che può influenzare la gestione dei rifiuti per coprire altre fasi del ciclo di vita di edifici e altre strutture.

Le principali azioni di un ciclo di vita, ispirate all'economia circolare, per un edificio possono essere sintetizzate come segue [14]:

- i. fase di produzione dei materiali: nuovi prodotti di alta qualità ad alto contenuto riciclato;
- ii. fase di progettazione: progettazione per lo smontaggio;
- iii. fase di costruzione: passaporti dei materiali;
- iv. fase d'uso: estensione a vita delle strutture esistenti;
- v. fase di fine vita: demolizione selettiva

#### 2.3.6 ACQUE E NUTRIENTI

La chiusura del cerchio in ambito di gestione delle risorse idriche richiede il passaggio a un nuovo paradigma che modifichi l'approccio attualmente utilizzato nei confronti delle acque reflue.

Il ciclo chiuso prevede il ricorso sistematico al riciclo e al riutilizzo nelle attività agricole, nei processi industriali, negli usi civili consentiti; in tal modo si potrà ridurre il prelievo delle risorse idriche naturali superficiali e sotterranee, migliorare le situazioni di stress idrico e minimizzare l'impatto sull'ambiente.

Con la transizione alla gestione circolare della risorsa idrica le acque reflue possono diventare una fonte alternativa e affidabile nonché una risorsa

sostenibile per la produzione di energia, di nutrienti e di altri utili sottoprodotti.

La direttiva [16] concernente il trattamento delle acque reflue urbane ha stabilito requisiti minimi per la raccolta e il trattamento delle acque reflue urbane e rappresenta uno dei principali strumenti politici dell'UE in materia di acque. Più lacunosi sono il quadro normativo e la diffusione delle pratiche che riguardano il riutilizzo dell'acqua e il recupero di sottoprodotti dalle acque reflue.

Nel pacchetto sull'economia circolare, particolare enfasi viene posta sulla necessità di diffondere il riutilizzo delle acque reflue in modo da aumentare l'approvvigionamento idrico e alleviare la pressione su risorse troppo sfruttate.

Nel 2011, a livello mondiale sono stati **riutilizzati 7 km<sup>3</sup> di** acque reflue trattate, pari allo 0,59% della domanda complessiva di acqua. Global Water Intelligence [15] stima un potenziale rilevante per la diffusione del riutilizzo delle acque reflue: entro il 2030 l'acqua riutilizzata potrà rappresentare l'1,66% (26 km<sup>3</sup> per anno) della domanda complessiva.

Gli usi in campo agricolo potranno essere prevalenti (32% dell'acqua riutilizzata verrà usata per scopi agricoli), segue il riutilizzo per scopi di irrigazione (20%) e usi industriali (19%).

In Europa, solo una piccola percentuale dell'acqua viene attualmente riutilizzata. Gli ultimi dati disponibili si riferiscono al 2006, quando è stato stimato che il volume totale delle acque reflue trattate e riutilizzate nell'UE era pari a 964 mm<sup>3</sup>/anno, rappresentando il 2,4% degli effluenti delle acque reflue urbane trattate e meno dello 0,5% delle acque estratte.

<b>Paese</b>	<b>Milioni di m3 annui</b>
UE-28	965
Spagna	347
Italia	233
Germania	42
Grecia	23

*Tabella 2.5 – Riutilizzo dell'acqua in Europa,*

*Fonte: TYPSA (2013) [17]*

Il Paese con la maggiore capacità di riutilizzo è la Spagna, che rappresenta circa un terzo del volume totale del riutilizzo delle acque nell'UE (347 mm<sup>3</sup>/anno), segue l'Italia dove l'utilizzo è stato di circa 233 mm<sup>3</sup>/anno. In entrambi i Paesi, l'acqua viene impiegata prevalentemente in agricoltura. Il riutilizzo di acqua riciclata è risultato significativo anche a Cipro (89% dei reflui trattati) e a Malta (appena sotto il 60%), mentre in Grecia, in Italia e in Spagna il riutilizzo dell'acqua rappresentava solamente una percentuale compresa tra il 5 e il 12% dei rispettivi reflui trattati [16].

Un maggior sviluppo e una crescente diffusione del riutilizzo delle acque nell'UE possono essere indotti sia dalle pressioni esercitate dai cambiamenti

climatici sia dalla necessità di diminuire gli impatti dello smaltimento delle acque reflue. Tali sviluppi dipenderanno dalle politiche e dalle tecnologie adottate e, per il trattamento delle acque reflue, dalle capacità tecniche necessarie a promuovere la diffusione del riutilizzo dell'acqua.

La Commissione Europea evidenzia diverse tipologie di ostacoli alla diffusione del riciclo [16], illustrati di seguito:

- incertezze nel quadro regolatorio
- norme estremamente rigorose in alcuni Stati membri
- frammentazione delle responsabilità e dell'autorità sulle diverse fasi del ciclo idrico
- barriere tecniche e incertezze scientifiche

In generale, i parametri fissati dall'Italia, la posizionano fra i Paesi con i requisiti qualitativi più stringenti nel panorama europeo; in alcuni casi i parametri di qualità applicati all'acqua riciclata sono gli stessi che si utilizzano per l'acqua potabile (20% dei parametri), in altri casi (37% dei parametri) gli standard non devono essere rispettati dall'acqua potabile ma solo dai reflui trattati e riciclati.

Un ulteriore ostacolo alla diffusione del riciclo delle acque nel nostro Paese è rappresentato dalla frammentazione gestionale e dalle modeste dimensioni medie degli impianti di depurazione.

La gestione della risorsa idrica in ottica circolare richiede interventi differenti nelle diverse fasi del ciclo. In particolare, risulta funzionale suddividere il ciclo di gestione in quattro fasi:

- i. Prevenzione dell'inquinamento alla fonte  
attraverso il divieto o il controllo puntuale nell'uso di alcune sostanze contaminanti con l'obiettivo di evitarne o ridurne il contatto con i flussi di acque reflue attraverso normative, mezzi tecnici e/o altro. Peraltro, l'intervento in fase di prevenzione presenta minori costi rispetto all'intervento ex-post per sanare risorse inquinate e/o contaminate.

Le acque reflue domestiche sono generalmente di buona qualità in quanto prive di sostanze pericolose salvo la crescente rilevanza di nuove sostanze inquinanti, tra cui i farmaci più comuni. Più critica è la tossicità e il carico di sostanze inquinanti nei reflui industriali.

- ii. Raccolta e trattamento delle acque reflue.

Solo una depurazione efficace può consentire il riutilizzo delle acque non solo in ambito agricolo (più tradizionale), ma anche per il comparto industriale e nei centri urbani. Il rilascio di acque reflue non trattate o trattate in modo inadeguato ha conseguenze importanti di diversa natura. Innanzitutto, il mancato trattamento dei reflui ha effetti nocivi sulla salute dell'uomo; secondariamente ha impatti negativi sull'ambiente e, infine, si verificano conseguenze negative sulle attività economiche.



- iii. Il riciclo dei reflui  
può rappresentare una fonte alternativa di acqua sia per l'irrigazione che per le industrie e per i centri urbani. La possibilità e convenienza del riutilizzo è legata in primo luogo alla prossimità fra il punto di riutilizzo e il punto di produzione, secondariamente al rapporto fra oneri sull'inquinamento e costo per la rimozione di sostanze inquinanti dai flussi di acque reflue.
- iv. Recupero dei sottoprodotti.  
Infine, il maggiore potenziale delle acque reflue ancora non sfruttato è quello di utilizzarle come fonte di risorse, ovvero per produrre energia e nutrienti. L'energia può essere recuperata sotto forma di biogas, per il riscaldamento o il raffreddamento e per generare elettricità. Inoltre, dai reflui è possibile recuperare azoto e fosforo utilizzabili per la produzione di fertilizzanti. Il recupero di fosforo dalle acque reflue offre un'alternativa realistica e percorribile alla scarsità della risorsa.

## CAPITOLO III

### STATO DELL'ARTE DEL RICICLO E RIUSO: CASI STUDIO INNOVATIVI NEL CONTESTO EUROPEO

I processi di trattamento dei rifiuti coprono un campo molto vasto, in particolare se applicati in ottica circolare.

La commissione europea fornisce un documento di riferimento sui processi di trattamento dei rifiuti chiamato BAT (Best Available Techniques)[18]. Questa documentazione indica le migliori tecniche di trattamento applicabili, in questo periodo storico, basandosi su fonti derivanti dalla letteratura scientifica e tecnica, questionari, siti web, revisioni, seminari e webinar.

La raccolta delle BAT suddivide i processi di trattamento dei rifiuti in 3 sottogruppi tematici:

- trattamenti biologici;
- trattamenti meccanici;
- trattamenti fisico-chimici.

La revisione dei documenti di riferimento sulle BAT (BREF) viene fatta in maniera continua in modo da garantire il più possibile l'attualità delle informazioni.

Un limite del sistema descritto dalle BAT è che la catena di attività coinvolte nella gestione circolare dei rifiuti si estende al di fuori del campo di applicazione dei BREF.

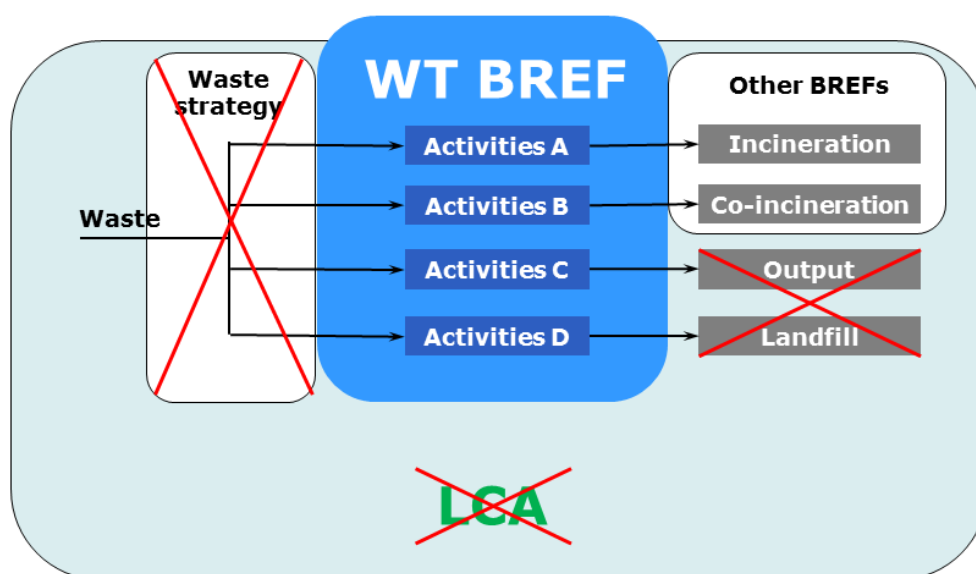


Grafico 3.1 – Gestione dei rifiuti non coperta dai BREF

LCA: Life Cycle Assessment

Fonte: Publications Office of the European Union, 2018 [18]

Una valutazione completa del ciclo di vita (LCA) sull'ambiente, applicata a un determinato rifiuto, può prendere in considerazione tutti i collegamenti della catena dei rifiuti ed avere un impatto sul prodotto finale.

Per questi motivi, al fine di fornire uno studio strutturato su tutto il ciclo dei rifiuti riciclati, oltre alle tecniche emergenti di trattamento dei rifiuti in abito di riciclo e riuso basata sui BREF, è stata condotta un'analisi dei dati

della letteratura su esempi di soluzioni tecnologiche per ottenere informazioni concrete e applicabili a tutto il modello di economia circolare.

Uno degli obiettivi del piano d'azione per l'economia circolare [7] della comunità europea per il prossimo decennio è proprio quello di integrare al modello BAT la valutazione completa del ciclo di vita (LCA) dei rifiuti.

### **3.1 TECNICHE EMERGENTI DI RECUPERO/RICICLO**

La direttiva UE 2010/75 [19] definisce una "tecnica emergente" come una "una tecnica innovativa per un'attività industriale che, se sviluppata commercialmente, potrebbe assicurare un più elevato livello di protezione dell'ambiente nel suo complesso o almeno lo stesso livello di protezione dell'ambiente e maggiori risparmi di spesa rispetto alle migliori tecniche disponibili esistenti". Questo capitolo estrapola dalla documentazione BAT [18] le "tecniche che potrebbero apparire nel prossimo futuro e che potrebbero essere applicabili al settore trattamento dei rifiuti".

#### **3.1.1 ANALISI ONLINE XRF**

La tecnica di analisi online "X-ray fluorescence" (XRF) [20] è uno degli ultimi sviluppi nel campo dell'analisi, è garanzia di qualità ed è applicabile praticamente a tutto il riciclaggio di metallo, plastica, legno, vetro, rifiuti di terra, fango e metallo non ferroso.

L'analisi online viene utilizzata per materiali frantumati e/o non schiacciati, con eliminazione automatica di materiali che non soddisfano i criteri di

qualità, ad es. per combustibili solidi recuperati, in particolare quando vengono superati i valori di cloro e/o bromo.

La tecnica si basa sull'analisi della fluorescenza a raggi X ad alta velocità, per cui una grande quantità di materiali frantumati o non schiacciati (a seconda delle definizioni e dalle prestazioni tecniche) può essere rilevata e analizzata ad ogni ora e può essere eliminata automaticamente dal sovraccarico dello stock nominale.

La configurazione dell'unità di misurazione dell'analizzatore avviene direttamente sopra un trasportatore. Se viene superato un valore limite, segue un segnale elettronico (digitale o analogico). Utilizzando software e/o un'unità elettronica, il materiale discutibile viene scaricato automaticamente (meccanicamente, idraulicamente, pneumaticamente, elettrostaticamente o magneticamente). L'unità di misurazione o analizzatore può essere dotata di uno o più tubi a raggi X o di uno o più rivelatori.

Come controllo aggiuntivo e garanzia di qualità per l'input di materiale, può anche essere usata un'unità portatile. L'unità portatile si basa anch'essa sul metodo di fluorescenza a raggi X e viene utilizzata in particolar modo per il rilevamento e l'analisi di cloro, bromo e metalli pesanti.

I seguenti elementi possono essere rilevati e analizzati con questo strumento (a seconda dell'attrezzatura e dei software):

Cl, Br, Cd, Hg, Pb, As, Se, Ni, Sb, Cu, Ba, Cr, Sn, Mo, Zn, Sr, Fe, Co, Ti, V, Rb, Ir, Pt, Au, Ag, Pd, Nb, W, Bi, Mn, Ta, Zr, Hf e Re.

### 3.1.2 ABBATTIMENTO DI VOC MEDIANTE IONIZZAZIONE E ADSORBIMENTO SU CARBONE ATTIVO

I composti organici volatili (VOC) provengono da olio, grasso e cera presenti nell'alimentazione del trituratore. In passato questi provenivano dallo smaltimento di veicoli fuori uso (EoLV); oggi gli EoLV vengono trattati con olio combustibile e altri liquidi disinquinanti.

Ne consegue che la dissoluzione dei VOC impedisce alla maggior parte delle fonti inquinanti di entrare nel processo di triturazione. Gli EoLV rappresentano il 30% dei rottami, la restante parte è composta da rottami misti. L'aumento dei rottami misti porta quindi ad una riduzione dei VOC e possono provenire da residui in bombolette spray, vernice in lattine e residui di olio. Altre fonti possono essere plastica, gomma e colle indurite.

Esistono diversi approcci tecnici per la rimozione di VOC attraverso sistemi di trituratore ad aria. In principio, ci sono quattro soluzioni:

- condensazione di VOC per raffreddamento forzato;
- adsorbimento di VOC da parte del carbone attivo;
- distruzione di VOC negli ossidanti termici rigenerativi;
- dissoluzione dei VOC nei liquidi.

L'abbattimento di VOC mediante la ionizzazione [21] (ossidazione di molecole organiche attraverso l'iniezione di aria ionizzata) e adsorbimento

su carbone attivo è di solito combinata con il monitoraggio continuo delle emissioni (Grafico 3.1).

L'aria viene ionizzata in una camera in cui gli elettrodi generano un forte campo elettrico. La camera di ionizzazione è dotata di un pre-filtro per consentire livelli di polvere sufficientemente bassi nell'aria estratta. In una successiva camera (di miscelazione), la corrente d'aria ionizzata viene combinata con la corrente di gas grezzo dal trituratore (15-20% di aria ionizzata rispetto all'aria di scarico totale), che è passato attraverso un filtro per garantire i livelli di polvere richiesti.

Infine, l'aria passa attraverso un filtro a carbone attivo. La rigenerazione del carbone attivo viene eseguita caricando l'aria ionizzata solo dopo il periodo operativo del trituratore, per ossidare (parzialmente) le molecole adsorbite.

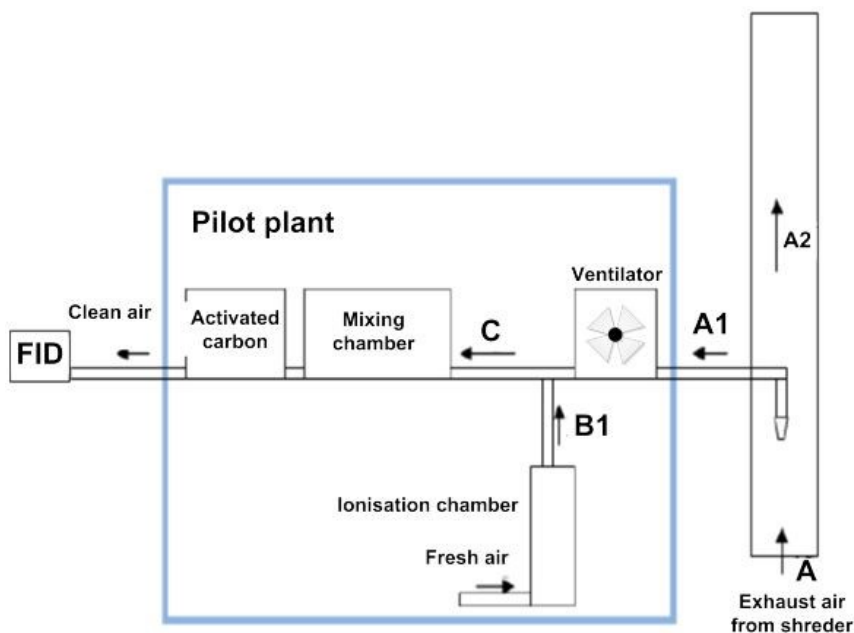


Grafico 3.1 – Schema di un sistema di ionizzazione e adsorbimento su carbone attivo [18].

Fonte: BAT Reference Document for Waste treatment Industrial Emissions, EUR29362EN, 2018.

La tecnica descritta è stata testata in un test pilota presso un impianto di triturazione austriaco di Loacker Recycling GmbH.

Il progetto è attualmente in corso, in base ai risultati si prevede la costruzione nell'impianto di una unità di filtraggio su larga scala.

Prestazioni potenziali rispetto alle migliori tecniche disponibili (BAT):

- riduzione delle emissioni di VOC con un'efficienza di abbattimento maggiore del 95%;
- ridotte emissioni di odori: nessun odore misurabile dopo l'uscita dal filtro;
- riduzione delle emissioni di polveri: livelli notevolmente inferiori rispetto ai tradizionali metodi di trattamento di aria di scarico con cicloni o abbattimento a umido.

Effetti ambientali:

- aumento del consumo di energia e dell'uso di materie prime (carbone attivo);
- generazione di ozono nel campo elettrico della camera di ionizzazione;
- generazione di rifiuti pericolosi: carbone attivo saturo da trattare.



### 3.1.3 COMPOSTAGGIO CON CONTAINER

È un metodo di compostaggio che si svolge in container chiusi e consente una fornitura naturale di ossigeno (processo aerobico) [22]. Il metodo può essere applicato ai rifiuti domestici, fanghi di depurazione, rifiuti da giardino, letame e altri prodotti organici.

L'impianto è costituito da uno spazio coperto con strutture di stoccaggio per le diverse frazioni di rifiuti così che si possono evitare odori e infiltrazioni d'acqua incontrollate (Grafico 3.2).

Le diverse frazioni organiche vengono caricate in un impianto di miscelazione per poi essere stratificate. Le impurità come pietre e materie plastiche vengono rimosse manualmente. L'impianto di miscelazione è dotato di celle di carico che tengono traccia della quantità di ciascuna frazione che entra nel mixer in modo da ottimizzare il processo biologico aerobico. Una coltura batterica viene aggiunta alla miscela per accelerare e migliorare il processo biologico. A seconda del bio-compost desiderato da produrre, vengono aggiunti additivi, ad esempio sotto forma di materiale strutturale, paglia, ceneri biologiche o sabbia.

Un trasportatore conduce il materiale miscelato in un contenitore in cui avviene il compostaggio effettivo. Il compostaggio può essere fatto all'aria aperta o in un ambiente coperto.

Il container è dotato di un piano superiore inclinato o di un coperchio, di un sistema di ventilazione, ed è provvisto di una doppia piastra perforata a forma piramidale. La struttura consente all'aria, che entra dal basso attraverso il tubo di ventilazione, di passare liberamente attraverso il materiale senza l'uso di energia. Una sonda di temperatura wireless registra la temperatura ogni mezz'ora. In genere la temperatura è di circa 60 °C dopo due giorni. Dopo circa 30 giorni, il compost viene disinfettato mantenendo la temperatura a 70 °C per un'ora durante il processo.

Infine, il compost viene ammucchiato in andane per altri 30 giorni prima di essere analizzato e dichiarato pronto per la commercializzazione come bio-compost: un fertilizzante organico e ammendante del suolo. In totale, il tempo di elaborazione è in genere di due mesi.

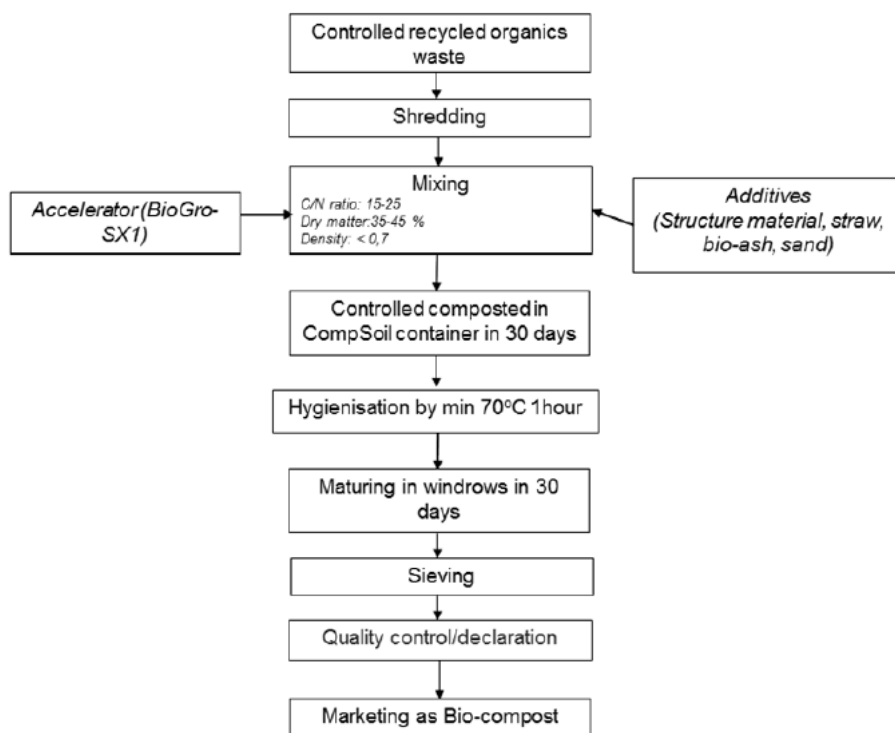


Grafico 3.2 – Processo di compostaggio con container[18] .

Fonte: BAT Reference Document for Waste treatment Industrial Emissions, EUR29362EN, 2018

Prestazioni potenziali rispetto alle migliori tecniche disponibili (BAT):

- la degradazione aerobica da parte del microrganismo è accelerata dall'uso di una coltura batterica, quindi, il tempo di elaborazione è molto più breve del compostaggio in andane (due mesi rispetto ai quattro mesi);
- rispetto al compostaggio in andane, le emissioni di odori sono molto basse;

- la perdita di azoto nel container di compostaggio è inferiore rispetto al compostaggio in andane (6% rispetto al 25%);
- il consumo di energia è molto inferiore rispetto al compostaggio in andane: 25 kWh per tonnellata di rifiuti immessi rispetto a 30 kWh per il compostaggio in andane;

Il costo operativo rispetto a quello del compostaggio in andane è dimezzato.

Il processo consente la scomposizione di xenobiotici, prodotti farmaceutici e prodotti per la cura personale per degradazione aerobica.

Il metodo si basa su processi ben noti e la dimensione della pianta può essere adattata continuamente, se necessario, investendo in contenitori e spazio per l'impianto.

Effetti ambientali:

- riduzione delle discariche e incenerimento dei rifiuti;
- riciclaggio di sostanze organiche in un circuito biologico.

#### 3.1.4 DIGESTIONE ANAEROBICA SECCA DEI RIFIUTI DOMESTICI ORGANICI

Rimozione, raccolta e riciclaggio di azoto e fosforo dalle acque reflue di un impianto di digestione anaerobica secca ("dry anaerobic digestion" - DAD) per il trattamento dei rifiuti solidi urbani indifferenziati [23].

È stato sviluppato un nuovo impianto compatto (AMRECO) per la rimozione e il riciclaggio di sostanze chimiche, azoto e fosforo liquido

proveniente da un impianto combinato di biogas/compostaggio di rifiuti solidi urbani in Thailandia, basato sul processo anaerobico secco (DAD). La rimozione di azoto e fosforo si basa sulla precipitazione di magnesio ammonio fosfato (MAP). Il processo è mostrato nel grafico 3.3.

Il risultato sarà una migliore resa del gas e il recupero e la conversione dei nutrienti dai rifiuti in un prezioso fertilizzante "pulito".

Gli scopi della tecnica sono:

- ottimizzare la produzione di biogas riducendo il carico N sul processo anaerobico;
- recuperare/utilizzare N e P mediante un nuovo processo di precipitazione chimica;
- produrre documentazione di prova su impianti e processi che può essere utilizzata per la rimozione/rigenerazione di N e P anche da altri tipi di fluidi (acque reflue, discarica percolato, ecc.)

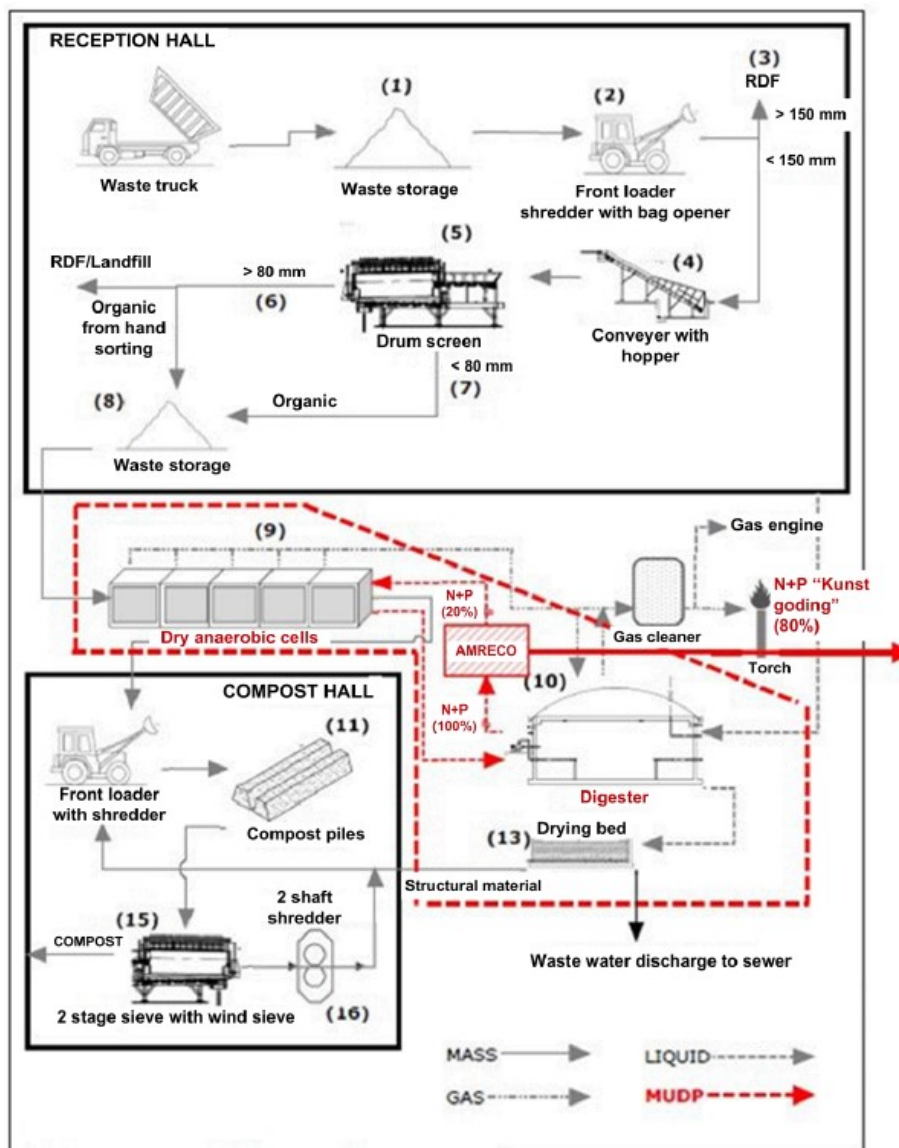


Grafico 3.3 – Processo DAD (dry anaerobic digestion) [18].

Fonte: BAT Reference Document for Waste treatment Industrial Emissions, EUR29362EN, 2018

Rispetto ai tradizionali impianti di biogas anaerobici umidi, gli impianti DAD hanno bassi requisiti per la struttura fisica e composizione dei rifiuti,

che rendono questo processo ottimale per la gestione di rifiuti urbani indifferenziati.

Effetti ambientali:

- Aumento della produzione di biogas a causa del ridotto effetto inibente dell'ammoniaca. L'obiettivo di produzione di biogas dell'impianto pilota è di 1,1 milioni di m<sup>3</sup>/anno. Per questo è previsto un aumento della resa di circa il 10%.
- Estrazione di azoto e fosforo dall'acqua. Le quantità annuali stimate dall'impianto pilota sono 15-20 tonnellate di azoto e 3-5 tonnellate di fosforo.

Allo stesso modo, sono previsti benefici ambientali per gli impianti di trattamento dei fanghi. Un'alta concentrazione di azoto nelle acque reflue dei serbatoi di digestione dei fanghi anaerobici porta spesso a un eccesso di carico del trattamento biologico esistente e può creare complicazioni.

La rimozione di azoto e fosforo dalle acque reflue può aumentare la capacità del trattamento delle acque reflue e può essere una seria alternativa all'espansione di un impianto.

### 3.2 PROGETTI E CASI STUDIO EUROPEI

I casi studio sono stati ricercati all'interno del programma quadro europeo per la ricerca e l'innovazione Horizon 2020 (H2020 [24]).

Il progetto H2020 permette di collegare e far interagire le eccellenze scientifiche con le leadership industriali per affrontare le sfide della società. Ha avuto un finanziamento in 7 anni (2014-2017) di quasi 80 miliardi di euro, oltre agli investimenti nazionali pubblici e privati, che lo hanno reso così il più grande programma di ricerca dell'UE a livello economico.

All'interno del "data hub" di H2020 [26] sono stati stimati i progetti di ricerca e innovazione (RIA) di economia circolare relativi al tema delle costruzioni e dell'ambiente.

Il tema "building" all'interno della categoria "Energy Efficiency" è raffigurato nella tabella 3.1. I progetti riguardanti l'Italia comprendono 28 enti pubblici e privati con un finanziamento di circa 10 miliardi di euro da parte dell'UE (grafico 3.4).



Grafico 3.4 - Horizon 2020 Energy Efficiency data hub [25].

Statistics Located in IT - In. Applying as Coordinator or Partner -Related to Buildings.

(\*) Italia paese coordinatore del progetto.

Fonte: EASME (<https://energy.easme-web.eu/#>)



Acronimo	Titolo Progetto	Budget €
4RinEU*	Robust and Reliable technology concepts and business models for triggering deep Renovation of Residential buildings in EU	4627953.75
DR-BOB	Demand Response in Block of Buildings	5136769.50
DRIVE 0	Driving decarbonization of the EU building stock by enhancing a consumer centred and locally based circular renovation process	4750641.25
EUFORIE	European Futures for Energy Efficiency	1092500.00
HERON	Forward-looking socio-economic research on Energy Efficiency in EU countries.	958750.00
IMPRESS	New Easy to Install and Manufacture PRE-Fabricated Modules Supported by a BIM based Integrated Design ProceSS	6041474.28
IN-BEE*	Assessing the intangibles: the socioeconomic benefits of improving energy efficiency	1009437.50
P2Endure	Plug-and-Play product and process innovation for Energy-efficient building deep renovation	5318599.93
Pro-GET-OnE*	Proactive synergy of inteGrated Efficient Technologies on buildings' Envelopes	5064600.00
RE4	REuse and REcycling of CDW materials and structures in energy efficient pREfabricated elements for building REfurbishment and construction	5117523.75
RIBuild	Robust Internal Thermal Insulation of Historic Buildings	5331375.00
StepUP	Solutions and Technologies for deep Energy renovation Processes UPtake	4944962.50
ZERO-PLUS	Achieving near Zero and Positive Energy Settlements in Europe using Advanced Energy Technology	4221947.50

Tabella 3.1 Horizon 2020 Energy Efficiency data hub [25].

Statistics Located in IT - In . Applying as Coordinator or Partner -Related to Buildings.

(\*) Italia paese coordinatore del progetto.

Fonte: EASME (<https://energy.easme-web.eu/#>)

I risultati all'interno della categoria "Environment and resources" mostrano 125 enti partecipanti con un finanziamento da parte dell'UE di circa 52 milioni di euro (grafico 3.5).



Grafico 3.5 -Horizon 2020 Environment and resources data hub [26].

Located in IT- In. Applying as Coordinator or Partner- Related to Circular economy.

Fonte: EASME (<https://sc5.easme-web.eu/#>)

Per affinare la ricerca sono stati presi in considerazione i progetti relativi al periodo gennaio 2015 - dicembre 2020 (tabella 3.3).

Acronimo	Titolo del progetto	Budget €
AgroCycle	Sustainable techno-economic solutions for the agricultural value chain	7650049.75
CIRC-PACK	Towards circular economy in the plastic packaging value chain	9252466.25
DAFNE	DAFNE: Use of a Decision-Analytic Framework to explore the water-energy-food NEXus in complex and trans-boundary water resources systems of fast growing developing countries.	5420222.68
DECISIVE	A DECentralized management Scheme for Innovative Valorization of urban biowaste	8751155.80
ECWRTI	ECOLORO: Reuse of Waste Water from the Textile Industry	4821392.50
FISSAC	FOSTERING INDUSTRIAL SYMBIOSIS FOR A SUSTAINABLE RESOURCE INTENSIVE INDUSTRY ACROSS THE EXTENDED CONSTRUCTION VALUE CHAIN	11523404.81
FLOWERED*	de-FLuoridation technologies for improving quality of Water and agRo-animal products along the East African Rift Valley in the context of aDaptation to climate change.	2989201.25
FORCE	Cities Cooperating for Circular Economy	11308117.50
INTCATCH	Development and application of Novel, Integrated Tools for monitoring and managing Catchments	8770935.00
INTEGROIL	Demonstration of a Decision Support System for a Novel Integrated Solution aimed at Water Reuse in the Oil & Gas Industry	5794442.50
MADFORWATER	DevelopMent AnD application of integrated technological and management solutions FOR wasteWATER treatment and efficient reuse in agriculture tailored to the needs of Mediterranean African Countries	4039418.75
MASLOWATEN	MARket uptake of an innovative irrigation Solution based on LOW WATER-ENERgy consumption	4875130.25
MOSES*	Managing crOp water Saving with Enterprise Services	4249262.50
NoAW	Innovative approaches to turn agricultural waste into ecological and economic assets	7816232.50
REFRESH	Resource Efficient Food and dRink for the Entire Supply cHain	9444757.79
REGROUND	Colloidal Iron Oxide Nanoparticles for the REclamation of Toxic Metal Contaminated GROUNDwater Aquifers, Drinking Water Wells, and River Bank Filtrations	2885362.50
REMEB	ECO-FRIENDLY CERAMIC MEMBRANE BIOREACTOR (MBR) BASED ON RECYCLED AGRICULTURAL AND INDUSTRIAL WASTES FOR WASTE WATER REUSE	2361622.50
RES URBIS*	REsources from URban Blo-waSte	3377915.00
RESLAG	Turning waste from steel industry into a valuable low cost feedstock for energy intensive industry	9668651.93
RESYNTEX	A new circular economy concept: from textile waste towards chemical and textile industries feedstock	11432356.25
SafeWaterAfrica	Self-Sustaining Cleaning Technology for Safe Water Supply and Management in Rural African Areas	2989998.13
SALTGAE	Demonstration project to prove the techno-economic feasibility of using algae to treat saline wastewater from the food industry.	9904938.14
SMART-Plant*	Scale-up of low-carbon footprint material recovery techniques in existing wastewater treatment plants	9768806.09

VicInAqua	Integrated aquaculture based on sustainable water recirculating system for the Victoria Lake Basin (VicInAqua)	2997710.00
WADI	WADI	4724143.99
Waste4Think	Moving towards Life Cycle Thinking by integrating Advanced Waste Management Systems	10521412.35
Water2REturn	REcovery and REcycling of nutrients TURNing wasteWATER into added-value products for a circular economy in agriculture	7129322.50
WATERSPOUTT	Water - Sustainable Point-Of-Use Treatment Technologies	3571945.83

Tabella 3.3 - Statistica Horizon 2020 Environment and resources data hub [26].

Located in IT- In. Applying as Coordinator or Partner- Related to Circular economy -Ending after 1/2015 - Ending before 12/2020.

(\*) Italia paese coordinatore del progetto.

Fonte: EASME (<https://sc5.easme-web.eu/#>)

I progetti pilota e le tecniche dimostrative descritte successivamente aiutano a mettere in pratica questi sviluppi tecnologici e a introdurli sul mercato più rapidamente. La seguente presentazione non è esaustiva, lo scopo è principalmente quello di illustrare, attraverso esempi concreti, i potenziali benefici introducendo azioni circolari in diverse fasi della catena del valore. Tutte le azioni sono connesse nella catena del valore e i vantaggi non possono essere assegnati esclusivamente a una fase specifica.

Nella tabella 3.4 sono mostrati alcuni progetti di questa ricerca con i rispettivi obiettivi e prodotti principali.

PROGETTO	OBIETTIVO	RISULTATI
RES URBIS	RES URBIS mira a rendere possibile la conversione di diversi tipi di rifiuti organici urbani in preziosi prodotti a base biologica, in una singola bioraffineria integrata per rifiuti organici e utilizzando una catena tecnologica principale. I rifiuti organici urbani comprendono la frazione organica dei rifiuti solidi urbani, i fanghi in eccesso derivanti dal trattamento delle acque reflue urbane, i rifiuti di giardini e parchi e i rifiuti selezionati della trasformazione alimentare [28].	Nuovi prodotti a base biologica comprendono poliidrossialcanoato (PHA) e relative bioplastiche a base di PHA, nonché produzioni ausiliarie: biosolventi (da utilizzare nell'estrazione del PHA) e fibre (da utilizzare per i biocompositi PHA). - Pellicola biodegradabile per materie prime. - Pellicola intercalare per imballaggi. - Durevoli speciali (come l'elettronica). - Materiale premium a rilascio lento per bonifica delle acque sotterranee.

MADFORWATER	L'obiettivo di MADFORWATER è sviluppare una serie di soluzioni tecnologiche e di gestione integrate per migliorare il trattamento delle acque reflue, il riutilizzo per l'irrigazione e l'efficienza idrica in agricoltura in tre MAC (Tunisia, Marocco ed Egitto) [27].	Le acque reflue trattate provenienti da una varietà di fonti possono ora essere utilizzate per irrigare le colture in modo efficiente dal punto di vista idrico grazie a nuove tecnologie e strumenti di gestione per alcune delle aree più aride del mondo.
SMART-Plant	Soluzioni eco-innovative ed efficienti dal punto di vista energetico per rinnovare gli impianti di trattamento delle acque reflue esistenti e chiudere la catena del valore circolare applicando tecniche a basse emissioni di carbonio per recuperare materiali altrimenti persi. Un portafoglio SMART completo che comprende biopolimeri, cellulosa, fertilizzanti e prodotti intermedi sarà recuperato e trasformato fino ai prodotti finali commercializzabili finali [29].	<p>Il progetto ha dimostrato diverse tecnologie (SMARTechs) in sette impianti pilota:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Processo per separare la cellulosa dall'acqua di scarico e trasformarla in fibre di cellulosa pulite.</li> <li>- Processo SCEPPHAR per il trattamento delle acque reflue e contemporaneamente il recupero dei prodotti (fino al 50% di fosforo e fanghi arricchiti con PHA, i biopolimeri più promettenti come sostituti della plastica a base di olio).</li> <li>- Processo di scambio ionico per recuperare ammoniaca e fosforo dalle acque reflue secondarie, per un possibile riutilizzo nelle industrie chimiche e dei fertilizzanti.</li> <li>- Il sistema SCENA e SCEPPHAR per il trattamento fanghi, fortemente caricato con azoto e nutrienti al fosforo, per rimuovere fino all'85% di azoto, recuperare il fosforo come struvite e produrre un fango arricchito con PHA, riducendo al contempo i costi energetici fino al 20% .</li> <li>- Utilizzo di materiali cellululosici e PHA per produrre plastica biocomposta che può essere utilizzata nel settore delle costruzioni o per beni di consumo.</li> <li>- Compostaggio dinamico per produrre fertilizzanti o biocarburanti commerciali dai fanghi ricchi di cellulosa e fosforo.</li> </ul>
CIRC-PACK	<p>Gli obiettivi generali del progetto contribuiscono ai pilastri principali dell'economia circolare della plastica:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- disaccoppiamento della catena dalle materie prime fossili; esplorando e sviluppando nuove materie prime provenienti da risorse rinnovabili e rifiuti.</li> <li>- Introduzione di formati innovativi e riduzione dell'impatto ambientale negativo degli imballaggi in plastica; migliorando la riciclabilità degli imballaggi multistrato e multimateriale (cartone + plastica) nonché le prestazioni di biodegradabilità per alcune applicazioni.</li> <li>- Creare un'economia della plastica efficace dopo l'uso; migliorando l'economia e la diffusione del riciclaggio, migliorando i tassi di riciclaggio e l'affidabilità della qualità delle materie plastiche recuperate per il riciclaggio [30].</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Il butandiolo (1,4-BDO) a base biologica è stato prodotto da rifiuti AHP, il tetraidrofurano (THF) è stato recuperato nel processo e sono state ottenute nuove formulazioni biopolimeriche per le applicazioni di imballaggio finale selezionate nel progetto: rigide (caffè capsule e flaconi per detersivi) e film (pellicola sigillante per vassoi per alimenti, scatole di plastica, sacchetti).</li> <li>- Sviluppo di 4 nuovi design di imballaggi per migliorare la percentuale di riciclaggio di imballaggi multistrato.</li> <li>- Dimostrazione di diverse strategie per migliorare il sistema di riciclaggio convenzionale e per convalidare un nuovo approccio per il riciclaggio di materiale plastico proveniente da diversi settori che aumenterà l'economia della plastica post-utilizzo attraverso una tracciabilità al 100% della qualità del riciclo Materiale.</li> </ul>

RE4	L'obiettivo generale del Progetto RE4 è quello di promuovere nuove soluzioni tecnologiche per la progettazione e lo sviluppo di elementi prefabbricati strutturali e non strutturali con elevato grado di materiali riciclati e strutture riutilizzate dalla demolizione parziale o totale di edifici. La tecnologia sviluppata mirerà a nuove costruzioni e ristrutturazioni ad alta efficienza energetica, riducendo così al minimo gli impatti ambientali [31].	Lo scopo finale è quello di sviluppare un edificio prefabbricato ad alta efficienza energetica che può essere facilmente assemblato e disassemblato per un futuro riutilizzo, contenente fino al 65% in peso di materiali riciclati da CDW. - Innovativo sistema di selezione CDW RE4 basato su robotica automatizzata dotata di sensori avanzati per aumentare la qualità del materiale derivato da CDW con il più alto interesse tecnico ed economico (es. ceramica, legno e legno, vetro, argilla, plastica e aggregati vergini per calcestruzzo). - Una serie di componenti edili prefabbricati RE4 basati su materiali e strutture derivati da CDW. - Relativi processi e attrezzature di produzione. - Un nuovo strumento ICT compatibile con BIM RE4 per gestire i flussi di materiali.
RESLAG	L'obiettivo principale di RESLAG è dimostrare che esistono settori industriali in grado di fare un uso efficace dei 2,9 Mt/a di scorie di acciaio smaltite in discarica. Il progetto mira a valorizzare il principale sottoprodotto dell'industria siderurgica: le scorie di acciaio. RESlag propone applicazioni innovative di valorizzazione: - come materia prima per il recupero di metalli ad alto valore aggiunto, - come materiale di accumulo di energia termica (TES) per il recupero di calore nell'industria siderurgica e per il settore dell'energia solare, - come materia prima per la fabbricazione di materiali refrattari [32].	Impianto pilota per la produzione di mattoni refrattari che utilizzano scorie di acciaio come aggregato è stato costruito nei laboratori Renotech di Turku (Finlandia). Viene fornita una preziosa banca dati sulle proprietà relative alle scorie contenenti proprietà calcinabili refrattarie rispetto a materiali refrattari commerciali. Le formule di ricetta sviluppate contengono 80% di scorie di acciaio (gli aggregati al 100% sono basati su scorie) con proprietà comparabili a quelle di riferimento commerciale.

Tabella 3.4 – Alcuni progetti di H2020 nel settore ambientale e delle costruzioni [27,28,29,30,31,32]

Quindi la maggior parte dei progetti atti al riciclo sono rivolti a recuperare biocomposti derivati da rifiuti organici, plastiche e imballaggi ( nella categoria delle risorse ambientali) o materiali complessi prefabbricati da rifiuti di costruzione e demolizione (nella categoria efficienza “energetica-building”).

### 3.2.1 LCA DEI RIFIUTI DI COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE

L'economia circolare può avere effetti profondi sulla gestione dei rifiuti da costruzione e sul raggiungimento degli obiettivi e delle politiche strutturali. In un'ottica circolare, la gestione di C&DW non è vista come un settore isolato ma come sistema, in cui l'analisi degli interventi tiene conto di tutte le parti del circuito.

Esempi tipici di azioni chiave nell'applicazione dei principi dell'economia circolare attraverso la suddivisione del ciclo di vita di un edificio, in diverse fasi, sono stati raccolti dalla letteratura, l'elenco seguente è stato ulteriormente elaborato con particolare attenzione ai rifiuti [15].

- i. Fase di produzione del materiale [33]:
  - i materiali da costruzione sono rinnovabili;
  - i processi produttivi hanno un basso impatto ambientale;
  - i materiali hanno un alto contenuto di materiale riciclato: poiché l'industria delle costruzioni utilizza grandi volumi di materiali, questo contenuto di materiale riciclato può anche provenire da una simbiosi industriale, in cui i rifiuti o i sottoprodotti di un'industria diventano input per un'altra;
  - i materiali sono altamente resistenti e hanno una lunga durata;
  - i materiali da costruzione non sono pericolosi.

Questi approcci possono rafforzarsi tra di loro. Ad esempio, l'uso di scorie di altiforni o ceneri volanti di combustione del carbone come

materiale cementizio supplementare riduce significativamente l'impatto ambientale della produzione di cemento.

ii. Fase di progettazione [34].

Una migliore progettazione è la chiave per facilitare il riciclo e aiutare a rendere gli edifici e i prodotti da costruzione più facili da riparare o più durevoli, risparmiando così risorse preziose.

L'azione possibile include:

- edifici modulari e facili da smontare;
- strutture durevoli, flessibili, aggiornabili, riparabili e adattabili che ne prolungano la durata;
- ridurre la quantità di materiali utilizzati evitando specifiche eccessive e utilizzando materiali ad alta resistenza;
- integrare le infrastrutture naturali (come i tetti verdi).

iii. Fase di costruzione:

- evitare avanzi di materiale utilizzando materiali da costruzione su misura;
- creare un passaporto materiale durante la costruzione;
- "additive manufacturing" (come la stampa 3D del calcestruzzo);
- selezione differenziata dei rifiuti di costruzione;
- dare via scorte indesiderate o eccedenti dalla costruzione;
- la gestione delle informazioni sugli edifici (BIM) aiuta a creare e mantenere valore attraverso l'intero ciclo di vita di un edificio e delle sue parti.

iv. Fase d'uso:

- aggiornare i modelli di informazioni sulla costruzione e il suo passaporto materiale durante l'uso;
- contratti basati sulle prestazioni per l'ambiente costruito;
- responsabilità estesa del produttore;
- aumentare l'intensità d'uso degli edifici attraverso, ad esempio, funzionalità flessibili per diversi utenti in diversi momenti della giornata, condividendo spazi di lavoro o abitativi;
- estensione della vita attraverso la riabilitazione avanzata - riparazione e rafforzamento - e adeguamento delle strutture;
- manutenzione di edifici e infrastrutture.

v. "End of life phase":

I flussi di materiale che attualmente derivano dai lavori di ristrutturazione e demolizione sono un'eredità dell'economia lineare e non sono sempre facili da smontare e alcuni, come i materiali incollati e l'isolamento spray, non consentono il riutilizzo o il riciclaggio di alta qualità. Per questi flussi di materiali, è importante stabilire pratiche di demolizione, metodi di elaborazione e logistica adeguati a chiudere il più possibile i cicli del materiale.

Il Protocollo UE sulla gestione dei rifiuti da costruzione e demolizione (CE, 2018 [35]) descrive le azioni da intraprendere nella fase di fine vita:

- controllo qualitativo del materiale pre-demolizione e pianificazione della gestione dei rifiuti;



- decontaminazione dell'ambiente costruito: rimozione e manipolazione sicura di materiali pericolosi;
- smistamento alla fonte di frazioni di materiali di alta qualità;
- monitoraggio dei lavori di demolizione e ristrutturazione per assicurare la qualità dei materiali da riciclare e riutilizzare;
- demolizione selettiva;
- preparazione di materiali da costruzione per il riutilizzo e il riciclaggio;
- aumento della tracciabilità, la valutazione della qualità e la certificazione dei flussi C&DW;
- miglioramento dei sistemi di selezione per materiali che non possono essere raccolti separatamente durante la demolizione.

Tra gli strumenti politici potrebbero essere inclusi strumenti di appalti pubblici verdi, norme per elementi riutilizzati e/o marchi di qualità ecologica per prodotti da costruzione. Inoltre, l'intelligenza artificiale e la digitalizzazione hanno il potenziale per rendere disponibili le informazioni per supportare modelli di business circolari.

### 3.2.2 MATERIE E METODI DI RECUPERO

I prodotti di alta qualità sono definiti come materiali o componenti utilizzati negli elementi strutturali di un edificio o infrastruttura con elevata durata. Questo implica prodotti o componenti che resistono al degrado durante le condizioni d'uso prevalenti. La durata dei componenti influenza direttamente la durata del prodotto finale. L'uso di rifiuti in prodotti di alta

qualità implica che i rifiuti mantengano il proprio valore e contribuiscono alla fornitura di materie prime; il riciclaggio di materiali con elevata energia incorporata può comportare un notevole risparmio di CO<sub>2</sub>; mentre la conservazione dei rifiuti nel circuito del materiale riduce la generazione di rifiuti per lo smaltimento.

### 3.2.2.1 AGGREGATI

Nella produzione di calcestruzzo vengono miscelati, aggregati fini e grossolani (sabbia e ghiaia) cemento, acqua e additivi. Gli aggregati grossolani, ottenuti da opere di demolizione, possono essere utilizzati per sostituire (parzialmente) aggregati naturali in applicazioni di calcestruzzo di alta qualità.

#### Processo di recupero.

La tecnologia “Advanced Dry Recovery” (ADR) è stata sviluppata e dimostrata da TU Delft per la separazione della malta dal calcestruzzo nel progetto FP2 C2CA e nel progetto H2020 HISER [36]. L'ADR è un processo meccanico a basso costo e può essere applicato a materiali umidi, senza previa essiccazione o schermatura a umido.

Il principio del processo ADR è illustrato nel grafico 3.4.

L'alimentazione è costituita da rifiuti di cemento provenienti dalla demolizione selettiva che viene frantumata in un materiale con un diametro

inferiore a 12 mm: la fresatura autogena viene utilizzata per rimuovere la malta sciolta dalla superficie dell'aggregato.

L'energia cinetica viene utilizzata per rompere il legame dell'acqua che si forma con l'umidità superficiale associata alle particelle fini. Dopodiché l'energia cinetica è usata per separare i materiali fini (inferiori a 1 mm di diametro), l'aggregato grosso (diametro di 4-12 mm), e una frazione intermedia (diametro di 1-4 mm) contenente impurità come legno, plastica e schiume. Gli aggregati grossolani, in genere quasi il 50% in volume, riciclati nel calcestruzzo hanno mostrato proprietà comparabili agli aggregati naturali in termini di lavorabilità e resistenza alla compressione.

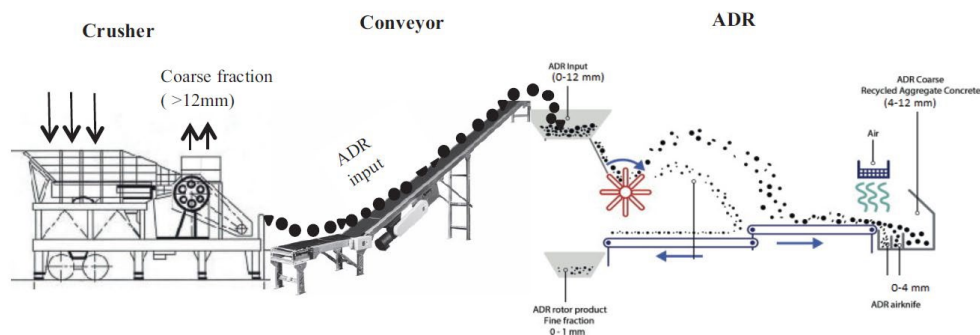


Grafico 3.4 - Principio di funzionamento del recupero a secco avanzato (ADR).

Fonte: Gebremariam et al., 2018 [14]

### Specificità in fase di recupero.

Il processo ADR è stato confrontato con la produzione di aggregato vergine ed ha mostrato benefici ambientali in 12 categorie su 15 valutate. Il massimo beneficio ambientale è stato ottenuto dal riciclaggio in loco o nelle

vicinanze. È consigliabile pertanto l'applicazione locale per gli aggregati riciclati.

Il riciclaggio di C&DW in prodotti di alta qualità ad alto contenuto riciclato supporta i principi dell'economia circolare mantenendo il valore del materiale nel circuito e sostituendo i materiali vergini. Nel calcestruzzo, il 20-30% del materiale vergine può essere sostituito da materiale di scarto in diverse applicazioni. È possibile ottenere una sostituzione più elevata, compresi i cicli multi-riciclaggio, in applicazioni di alto livello se i materiali fini vengono separati dai concreti materiali di scarto. Poiché la frazione grossolana, con un diametro superiore a 4 mm, produce quasi la metà dei rifiuti di calcestruzzo, idealmente la metà dei rifiuti di calcestruzzo potrebbe essere riciclata in applicazioni di alta qualità.

Le parti interessate coinvolte nel riciclaggio del calcestruzzo sono illustrate nel grafico 3.5.



Grafico 3.5 Stakeholder coinvolti nel riciclaggio dei rifiuti di cemento dalla demolizione.

Fonte: Lofti (2016) [14]

Le principali barriere sono i costi di elaborazione ragionevoli e la fiducia nella qualità, per i quali sono necessari sistemi di tracciabilità per controllare l'origine dei flussi di rifiuti.

L'inclusione di un elevato contenuto di aggregato riciclato da C&DW in prodotti di alta qualità non ha un vantaggio significativo per le emissioni di

CO<sub>2</sub> a causa delle esigenze di elaborazione aggiuntive. Il principale vantaggio ambientale è legato al risparmio di risorse naturali.

### 3.2.2.2 PLASTICA

Il settore delle costruzioni è un importante motore della prosperità europea. Tuttavia, è anche un grande consumatore di materie prime e produce grandi quantità di rifiuti da costruzione e demolizione (CDW). La plastica e il legno in genere costituiscono la frazione leggera di CDW. Invece di essere smaltiti, possono essere potenzialmente riutilizzati per scopi di isolamento.

#### Caratteristiche principali.

Le particelle di plastica sono state precedentemente utilizzate come aggregati nei compositi di calcestruzzo. Akçaözoğlu, Akçaözoğlu e Atiş (2013) [37] hanno prodotto calcestruzzi contenenti il 60% di rifiuti di plastica con una conduttività termica di 0,39 W/mK, in confronto, la sabbia ha una conduttività termica di circa 2 W/mK.

I granuli di bottiglie in polietilentereftalato PET usati come aggregato (WPLA) sono stati forniti dall'impianto di bottiglie in PET SASA, a Adana, in Turchia. Le dimensioni massime e il peso specifico di WPLA erano rispettivamente di 4 mm e 1,27g/cm<sup>3</sup>. È stato utilizzato cemento Portland di tipo I conforme alla specifica TS EN 197-1. La resistenza a compressione a 28 giorni del cemento era di 52,7 MPa. Il peso specifico del cemento

utilizzato era di  $3,10 \text{ g/ cm}^3$  e la superficie specifica misurata con il metodo Blaine era di  $3670 \text{ cm}^2/\text{g}$ .

I tempi di presa iniziale e finale del cemento erano rispettivamente di 143 e 200 minuti. Nelle miscele sono state utilizzate sabbia naturale non frantumata, quarzatica con dimensione massima di 4 mm e aggregato grezzo basaltico frantumato con dimensione massima di 16 mm secondo TS 706 EN 12620. I pesi specifici degli aggregati fini e grossolani allo stato secco superficiale saturo (SSD) erano rispettivamente  $2,45 \text{ g/ cm}^3$  e  $2,57 \text{ g/ cm}^3$ . I valori di assorbimento d'acqua di aggregati fini e grossolani erano rispettivamente del 2,5% e 2%.

#### Processo di recupero.

La progettazione della miscela di riferimento è stata realizzata secondo il metodo del volume assoluto. Il rapporto acqua-cemento usato nelle miscele è stato scelto come 0,50. Il contenuto di cemento è stato mantenuto costante per metro cubo,  $500 \text{ kg/ cm}^3$ . Il contenuto approssimativo di aria della miscela di calcestruzzo fresco è stato stimato dell'1% utilizzando una granulometria aggregata totale. Per ogni miscela di calcestruzzo di un metro cubo, la composizione approssimativa del calcestruzzo è riportata nella Tabella 3.5. I rapporti di sostituzione erano del 30%, 40%, 50% e 60% in volume. Sono stati lanciati campioni cubici con un lato di 150 mm e utilizzati per la misurazione del peso unitario, della resistenza a compressione e dei test di velocità delle onde ultrasoniche.

Mixture name	PET amount (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )					Slump (cm)	
		NPC	Water	Coarse aggregate	Fine aggregate	PET	SP	
M0	0	500	250	575	877	0	0	16
M1	30	500	250	402	615	218	2	15
M2	40	500	250	345	526	292	5	14
M3	50	500	250	288	438	365	6	14
M4	60	500	250	230	350	437	7.5	12

Tabella 3.5 - Composizione approssimativa nel calcestruzzo per un metro cubo

Fonte: Akçaözöğlü, S., Akçaözöğlü, K., & Atiş, CD (2013) [37]

### Specificità in fase di recupero.

I campioni hanno mostrato migliori proprietà isolanti a seconda dell'incremento della quantità di WPLA nella miscela. La riduzione massima del valore TC è stata del 58% per la sostituzione del 60% di WPLA, è stato mostrato alla miscela M4. Gli aggregati di PET tendevano a rallentare la propagazione del calore che a sua volta diminuiva la conduttività globale del composito. Si conferma che l'aggiunta di aggregato di PET nella miscela ha causato la riduzione della conducibilità termica dei campioni a causa del basso coefficiente TC del PET. È stata mostrata una relazione lineare tra i pesi unitari e la conduttività termica dei campioni. I pesi unitari a secco delle miscele inclusi 40%, 50%, 60% WPLA erano entro i limiti del peso unitario della categoria di calcestruzzo leggero. La miscela contenente il 40% di WPLA è stata introdotta nella categoria di calcestruzzo leggero strutturale. La resistenza a compressione dei campioni è diminuita con

l'aumentare della quantità di WPLA nella miscela. Il motivo principale di questa situazione potrebbe essere l'adesione tra WPLA e pasta di cemento che potrebbe non essere forte come il legame tra aggregato naturale e pasta di cemento. Questo problema potrebbe essere eliminato con l'utilizzo di alcuni metodi di trattamento superficiale.

Sulla base dello studio sperimentale, l'uso del WPLA nei compositi di calcestruzzo ha il potenziale per ridurre il peso morto del calcestruzzo, quindi potrebbe essere utile nella progettazione di un edificio antisismico. I compositi WPLA possono ridurre il rischio sismico di un edificio a causa dei loro bassi valori di peso unitario. A tale scopo, possono essere utilizzati come pavimento leggero nei sistemi di pavimenti compositi in acciaio-cemento e pavimenti prefabbricati in calcestruzzo. Inoltre, l'uso di WPLA nelle applicazioni di costruzione può essere utile per l'interesse ambientale.

### 3.2.2.3 LEGNO

Il legname ha un grande potenziale di riciclaggio. Se il legname strutturale non può essere riutilizzato come elemento strutturale da solo, può essere convertito in glulam o ulteriormente trattato per elementi non strutturali [38], tra cui pannelli, pannelli di protezione dagli agenti atmosferici e prodotti a base di trucioli o fibre (EN14081-1, 2016, EN 14080, 2013).

#### Processi di recupero.

Come condizione preliminare, le sezioni di legno riciclato devono essere prive di conservanti del legno, infestazione da funghi o insetti e gravi danni.



È sufficiente un'ispezione visiva in loco per determinare l'infestazione da funghi o insetti e quindi potenziali danni. Inoltre, consente l'identificazione della specie legnosa, della sua natura e del contenuto di umidità. La densità grezza può essere stimata attraverso i dati della letteratura, nel caso in cui non siano disponibili informazioni sulla posizione di crescita del legname CDW. Le sezioni recuperate devono quindi essere pulite da impurità (come raccordi metallici, vernici, ecc.) per essere valutate in termini di dimensioni e posizione di fessure, rami e pendenza del grano. L'ispezione visiva può essere integrata con studi di laboratorio per determinare la presenza di contaminanti. A seconda del sito e delle indagini di laboratorio, la sezione in legno può essere tagliata per rimuovere le sezioni danneggiate e riutilizzata come sezioni intere, trattata per preparare il glulam o riutilizzata come pannelli meteorologici (grafico 3.6).

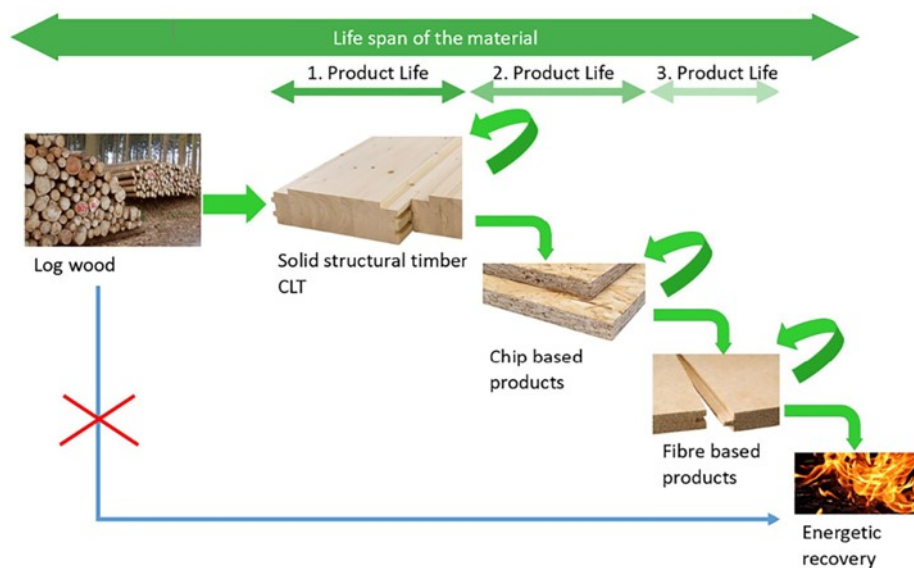


Grafico 3.6- Durata della vita e riciclaggio di legname e prodotti in legno.

Fonte: Novel construction and demolition waste (CDW) treatment and uses to maximize reuse and recycling; Mark James Whittaker, 2019 [38]

### 3.2.2.4 MATERIALI CERAMICI

I mattoni e le piastrelle, oltre al più semplice uso di aggregato riciclato, possono essere utilizzati come materiale cementizio supplementare o come precursore per la produzione di un legante alcalino attivato [38].

#### Caratteristiche principali.

L'uso della metakaolina è noto per aiutare a migliorare le proprietà delle malte a base di cemento Portland [39]. Le presunte somiglianze tra le caratteristiche della metakaolina e quelle di un rifiuto pulito in polvere (<45 µm) di mattoni di argilla cotti (CBW) hanno portato all'indagine dell'effetto sulla durabilità delle malte con sostituzione parziale (10%, 25% e 40% in peso) di cemento Portland in CBW. I rifiuti di laterizio (CBW) sono stati ottenuti da mattoni a cottura industriale scartati dall'industria ceramica a causa della presenza di crepe, dimensioni irregolari o altre imperfezioni. La caratterizzazione del CBW comprendeva la determinazione dell'area di superficie specifica BET (analizzatore di superficie Gemini V2.00), la distribuzione delle dimensioni delle particelle (diffrazione laser, CILAS 1064), l'analisi chimica (fluorescenza a raggi X, Philips PW 2400) e l'identificazione di fasi cristalline (diffrazione dei raggi X, Shimadzu XRD 6000, usando la radiazione Cu K $\alpha$ ).

#### Processo di recupero.

La sabbia di quarzo con particelle di dimensioni comprese tra 150 e 2360 µm (media 510 µm) è stata utilizzata come calce aggregata e idrata CH-III

(Associazione brasiliana per gli standard tecnici) con il 75% delle particelle <75 $\mu$ m. Sono state preparate varie malte in cui il cemento Portland è stato sostituito con CBW fino al 40 % in peso (Tabella 3.6).

Formulation	Mixture components <sup>a</sup> (g)					Flow index (mm)
	PC	CBW	Lime	Sand	Water	
0	394	–	409	3305	986	267.0 $\pm$ 1.3
10	344	38	418	3381	955 (1047 <sup>b</sup> )	246.3 $\pm$ 1.5
25	272	90	433	3504	907 (1109 <sup>b</sup> )	208.7 $\pm$ 1.1
40	205	136	450	3636	854 (1124 <sup>b</sup> )	172.0 $\pm$ 0.6

Tabella 3.6 – Formulazione di malte fresche e indice di flusso corrispondente [39].

Fonte: *Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars*; A. Schackow, 2015

Le analisi XRD e FTIR suggeriscono che i rifiuti di mattoni in argilla in polvere (CBW) hanno caratteristiche simili a quelle dei materiali pozzolanici, poiché hanno rivelato la formazione di caolinite deidrossilata e silice amorfa su calcinazione a 700 °C.

Il miglior bilanciamento (prestazione ottimale) è stato trovato per la malta al 40 % in peso di CBW.

Pertanto, le aggiunte di CBW descritte portano a cambiamenti microstrutturali che promuovono le prestazioni fisiche e meccaniche delle malte, anche se potrebbero comportare un certo sacrificio nella durabilità chimica. Tuttavia, le proprietà studiate suggeriscono che è auspicabile un'aggiunta moderata di CBW (fino al 10 % in peso) se si desidera una lavorabilità comparabile.

### 3.3.3 CAMPI DI APPLICAZIONE E CONTESTI DI RIUTILIZZO

I campi di applicazione dei prodotti secondari sono molteplici, a titolo di esempio, sono stati illustrati alcune applicazioni del progetto RE4 (REuse, REcycling, PREfabrication, REfurbishment) di H2020 [31].

L'obiettivo generale del Progetto RE4 è quello di promuovere nuove soluzioni tecnologiche per la progettazione e lo sviluppo di elementi prefabbricati strutturali e non strutturali con elevato grado di materiali riciclati e strutture riutilizzate dalla demolizione parziale o totale di edifici. La tecnologia sviluppata mirerà a nuove costruzioni e ristrutturazioni ad alta efficienza energetica, riducendo così al minimo gli impatti ambientali.

Lo scopo finale è quello di sviluppare un edificio prefabbricato ad alta efficienza energetica che può essere facilmente assemblato e disassemblato per un futuro riutilizzo, contenente fino al 65% in peso di materiali riciclati da CDW.

Ciò ha comportato numerosi risultati industriali intermedi ma autonomi, tra cui:

- l'innovativo sistema di selezione CDW RE4 basato su robotica automatizzata dotata di sensori avanzati per aumentare la qualità del materiale derivato da CDW con il più alto interesse tecnico ed economico (es. ceramica, legno e legno, vetro, argilla, plastica e aggregati vergini per calcestruzzo);

- una serie di componenti edili prefabbricati RE4 basati su materiali e strutture derivati da CDW
- relativi processi e attrezzature di produzione;
- un nuovo strumento ICT compatibile con BIM RE4 per gestire i flussi di materiali.

Lo sviluppo del progetto ha portato alla produzione di cinque nuovi materiali in calcestruzzo con proprietà diverse, quattro nuovi componenti (blocchi, piastrelle, legno e pannelli isolanti) e quattro nuovi elementi prefabbricati (pannelli per facciate in cemento e legno, elementi portanti in calcestruzzo e pareti divisorie interne). In tutti questi prodotti il 50-85% di nuovo materiale è stato sostituito con elementi riciclati. L'innovativo concetto di costruzione di RE4 consente di costruire una nuova casa con strutture riutilizzabili fino al 100% (grafico 3.7).

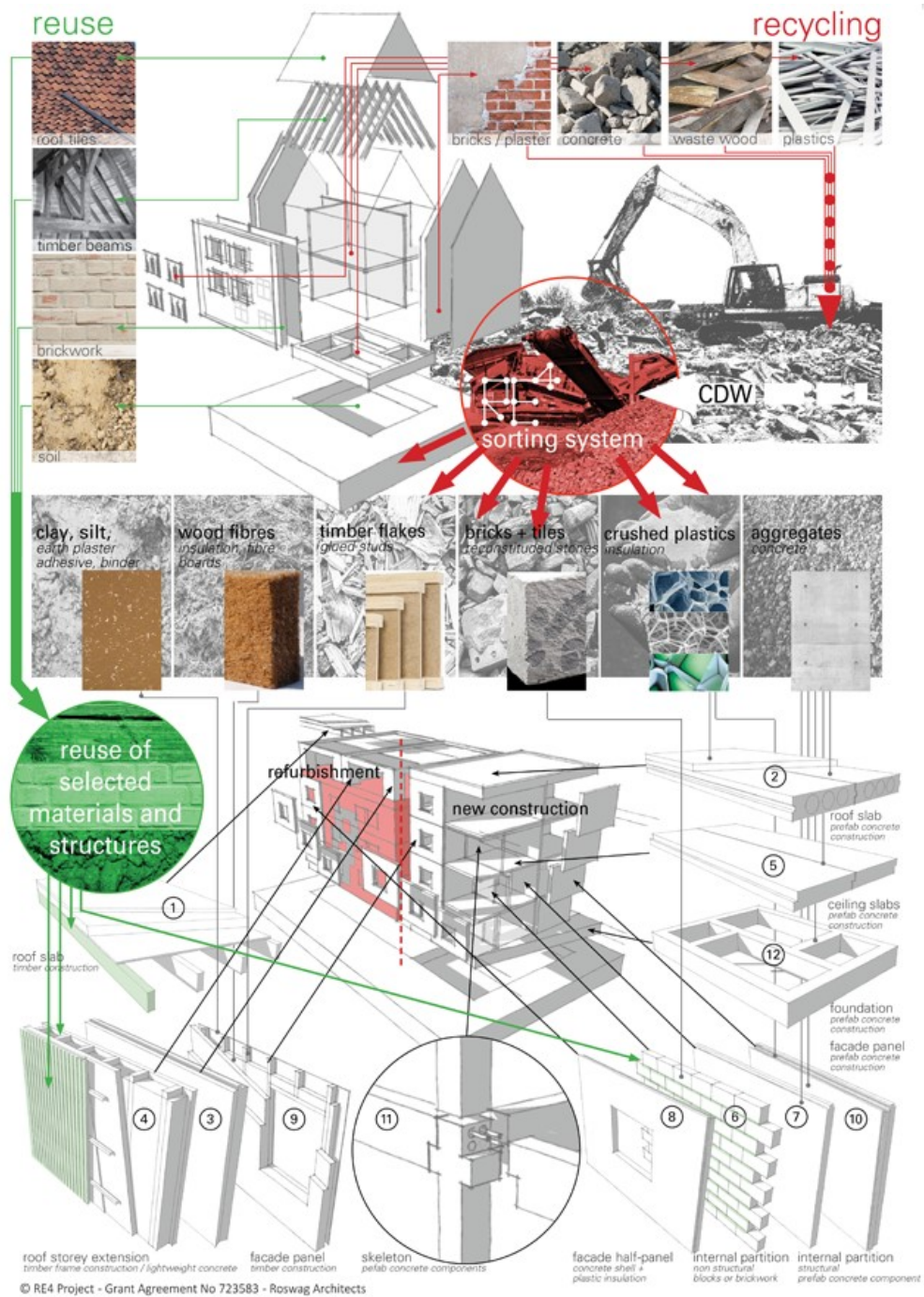


Grafico 3.7 - Progetto RE4

Fonte: <http://www.re4.eu/project-description> [40]

### 3.3.3.1 CALCESTRUZZO

Il calcestruzzo è forse il materiale focale a causa dell'ampiezza degli elementi strutturali e non strutturali che possono essere considerati nell'ambito del progetto. L'approccio dello studio consisteva nel progettare vari tipi di calcestruzzo e gradi di resistenza da cui potevano essere realizzati vari elementi (travi, colonne, lastre, blocchi, facciate, scale, ecc.).

Il tipo di calcestruzzo progettato (tabella 3.7) include 3 tipi di miscele: calcestruzzo - vibrato (VC), autocompattante (SCC) e semi-secco (SD). Dopo aver effettuato i mix di prova, i calcestruzzi progettati hanno raggiunto gli obiettivi di resistenza e lavorabilità stabiliti dai produttori nell'ambito del progetto. La sostituzione dell'aggregato vergine variava dal 70% al 100% a seconda della fonte dell'aggregato riciclato e del tipo di calcestruzzo prodotto.

Product	Strength class	Consistency class	RA content (%)	Intended use
VC	C25/30	S2/S3	100	Structural
	C32/40	S3		
SCC	C40/50	640–770 mm based on slump flow test	40–80	Structural
SD	7.3 MPa	N/A	70	Building blocks

Tabella 3.7 - Diversi tipi di calcestruzzo che incorporano alti livelli di aggregato derivato da CDW.

Fonte: *Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars*; A. Schackow, 2015.

### 3.3.3.2 PRODOTTI DERIVATI DAL LEGNO

A condizione che una sezione in legno sia priva di danni, come spiegato in precedenza, la sezione può essere riutilizzata come elemento strutturale con un trattamento minimo. Il legno di recupero può anche essere ulteriormente

trattato per la produzione di legno lamellare. A seconda del grado di resistenza finale, della natura dell'elemento e della sua conservazione, è possibile adottare diverse strategie per riutilizzare il legno, tra cui [38]:

- Riutilizzo completo dell'elemento con elaborazione minima
- (Grafico 3.8a).
- Rielaborazione in sezioni trasversali standardizzate.
- Ricondizionamento in lamelle per la fabbricazione di glulame (Grafico 3.8b).



a) Reclaimed timber sections



b) Glulam from reclaimed timber

*Grafico 3.8 . Conversione della sezione di legno di recupero in legno lamellare.*

*Fonte: Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars; A. Schackow, 2015.*

All'interno di RE 4 , il legno di recupero è stato testato per essere utilizzato come sezioni intere ricevute dal sito o come legno lamellare. Nel caso di travi in legno lamellare, è stato scelto il grado di resistenza del legno GL24, il che significa che le travi in legno hanno raggiunto una resistenza a flessione target di 24 MPa. Se gli elementi non fossero idonei all'uso come elementi strutturali, il legname potrebbe potenzialmente essere ancora riutilizzato per preparare elementi non strutturali, ad esempio per essere



riciclato come pannelli (completo di isolamento contenente ad esempio trucioli di legno riciclato CDW) o rivestimento.

### 3.3.3.3 SVILUPPO DI ELEMENTI ISOLANTI IN CDW

Le tipiche particelle leggere di CDW utilizzate nel progetto erano costituite da particelle di plastica rigida, scarti misti di legno/plastica e fibre di legno. RE4 ha tentato di utilizzare queste frazioni nello sviluppo di materiali isolanti a bassa densità e bassa conducibilità termica [38]. A seconda della fonte, particelle di plastica rigida o scarti misti di legno/plastica potrebbero sostituire rispettivamente fino al 70% e al 50% della frazione aggregata naturale.

Per i pannelli isolanti contenenti materie plastiche rigide, le particelle di plastica erano incorporate nella schiuma poliuretana, già un popolare materiale isolante a cavità. Il rapporto tra aggregato e legante è stato variato per creare pannelli con diversi valori di densità, dal 5% di plastica al 50% di plastica in volume. I pannelli si sono comportati meglio con un contenuto di plastica del 5%, mantenendo bassa la densità e il coefficiente termico. Sono state anche utilizzate fibre di legno ( $\leq 4$  mm) e materie plastiche rigide per preparare pannelli isolanti, modellati nella forma.

Requirements	Targeted performance	Rigid plastics	Wood/plastics
Consistency class	S4	S4/S5	S5
Density ( $\text{kg/m}^3$ ) @ 28 days	800–1400	1260	1250
Compressive strength (MPa) @ 28 days	4.5–24.0	7.5	4.5
Thermal conductivity (W/mK) @ 28 days	0.16–1.00	0.31	0.29

Tabella 3.8 - Set di requisiti per calcestruzzi leggeri per pannelli realizzati con particelle di plastica rigida e scarti misti di legno/plastica [38].

Fonte: *Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars*; A. Schackow, 2015.

Per i pannelli in fibre di legno (Grafico 3.9), il legno è stato prima immerso in acqua per 72 ore. Successivamente, il legno è stato compattato in stampi e tenuto sotto pressione, a 15 bar e 120 ° C o 160 ° C da 3,5 a 30 h. Alla fine, i pannelli sono stati asciugati. Per migliorare la loro resistenza al fuoco, prima di realizzare i pannelli, il legno è stato mineralizzato forzando una soluzione di MgO sotto pressione. I pannelli di fibre di legno ottimizzati hanno raggiunto una densità di 215 kg/m<sup>3</sup> e una conduttività termica di 0,07 W/mK.



Grafico 3.9 - Progetto RE4 pannelli isolanti in fibre di legno [40];

Fonte: <http://www.re4.eu/project-description>

#### 3.3.3.4 PAVIMENTAZIONI E RIVESTIMENTI

RE4 ha cercato di riutilizzare prima i rifiuti ceramici come precursore dei leganti attivati da alcali. La polvere macinata comprendeva sia mattoni rossi che scarti di piastrelle [38]. L'attivazione è avvenuta utilizzando una miscela di ossido di sodio ( $Na_2O$ ) e  $Na_2SiO_3$  variando la loro proporzione. Il contenuto di  $Na_2OM$  + è stato fissato in percentuale del precursore in massa. Il contenuto di  $Na_2SiO_3$  è stato espresso come rapporto di  $Na_2O/$

$SiO_2$  (noto come modulo alcalino AM) e varia da 0,5 a  $+\infty$ . Il contenuto di acqua/legante (w/b) è stato fissato a 0,37. A seconda della composizione chimica della soluzione attivante, cubetti di malta da 50 mm polimerizzati per 28 giorni a 70 ° C hanno raggiunto livelli di resistenza fino a 30 MPa.

La ceramica è stata anche riutilizzata come pavimento o rivestimento (Grafico 3.10). Ciò è stato ottenuto miscelando la frazione ceramica macinata e resina per poi lasciare indurire la miscela in stampi. Sono stati studiati la classificazione della polvere ceramica e il rapporto resina/ceramica per ottenere le proprietà di resistenza e lavorabilità desiderate.




Grafico 3.10 – Pavimentazione in piastrelle da rifiuti ceramici [40].

Fonte: <http://www.re4.eu/progress>

Le prestazioni ottimali, ottenute con una linea di produzione su scala di laboratorio, sono state raggiunte mescolando in massa 3 parti di resina a 7 parti di ceramica macinata. Per queste piastrelle è stata ottenuta una resistenza alla flessione di 19,7 MPa secondo EN 14617-2, 2016 e una resistenza a compressione di 54,4 MPa secondo EN 14671-15, 2005.

### 3.3.3.5 TEST PILOTA

Il test finale arriverà durante le prove pilota. Diversi siti sono stati identificati tra i partner, incluso uno nell'Irlanda del Nord, uno in Spagna e un altro in Italia [38]. La tabella 3.9 illustra alcuni degli elementi progettati per essere testati in un edificio a due piani.

Type of element/component	Side elevation of two-storey demo building
Reinforced concrete beams, columns, slabs & stairs	
Sandwich panels (load-bearing <sup>1</sup> & non-load-bearing <sup>2</sup> )	
Semi-dry mix concrete building blocks	
Timber façades	
Timber based inner partitions	
Wood fibre insulation panels	
Rigid plastic insulation panels	
Concrete roof tiles (made using extrusion)	

<sup>1</sup>Load-bearing sandwich panels consist of two layers of steel reinforced SCC (C40/50) and a PE-PIR insulation board.

<sup>2</sup>Non-load-bearing sandwich panels consist of one layer of steel reinforced SCC (C40/50), one PE-PIR insulation board and one layer of textile reinforced high performance concrete.

Tabella 3.9 - Tipi di elementi (portanti e non portanti) e componenti di un edificio da testare [38].

Fonte: Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars; A. Schackow, 2015

Per quanto riguarda i prodotti in calcestruzzo, il tasso di riciclaggio stimato varia dal 40% al 90%, a seconda degli elementi. Per quanto riguarda gli elementi in legno, il tasso di riciclaggio può essere efficace fino al 100%.

Attualmente sono in corso la costruzione di edifici dimostrativi nell'Irlanda del Nord e in Spagna, nonché la ristrutturazione di un edificio in Italia. Una volta completati i lavori di costruzione e ristrutturazione, tutti e tre gli edifici saranno monitorati in termini di efficienza energetica e confrontati con quelli convenzionali.

Si presume che i pannelli portanti sandwich convenzionali abbiano una durata di servizio di 50 anni ed essendo progettati per un facile smontaggio e riutilizzo si presume una durata totale di 100 anni per la fine del loro ciclo di vita (grafico 3.11).

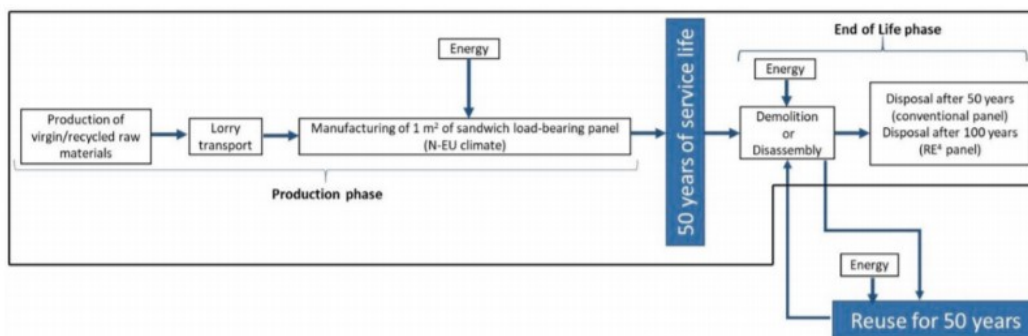


Grafico 3.11 - Confini del sistema considerati per E-LCA e LCC di pannelli sandwich portanti [38].  
 Fonte: Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars; A. Schackow, 2015

La produzione del pannello RE4 ha generato una quantità significativamente inferiore di impatto ambientale complessivo rispetto al pannello convenzionale (grafico 3.12).

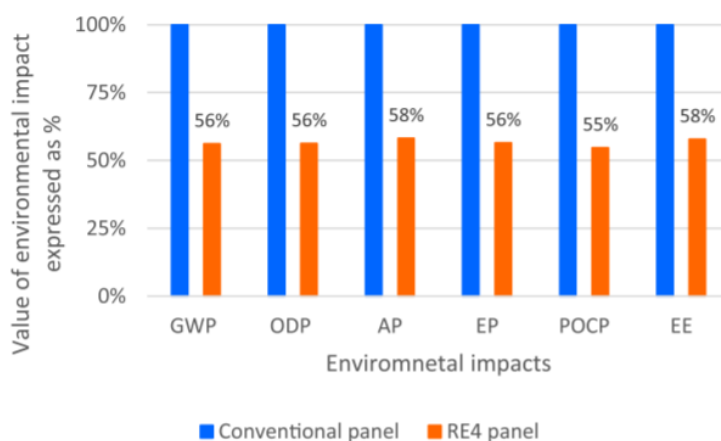


Grafico 3.12 - Confronto tra pannello convenzionale e RE4 durante la fase di fine vita [38].  
 Fonte: Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars; A. Schackow, 2015.

## CONCLUSIONI

Per esplorare i legami tra l'implementazione di azioni ispirate all'economia circolare e la gestione dei rifiuti, è stata sviluppata una metodologia con l'obiettivo di identificare le pertinenti azioni dell'economia circolare e mostrare esempi che hanno contribuito al raggiungimento degli obiettivi della politica sui rifiuti. La trattazione è stata eseguita con un approccio graduale:

- I. Scenario sulla produzione dei rifiuti in Europa (con un focus sull'Italia);
- II. Descrizione dell'attuale gestione dei rifiuti. Individuazione delle azioni sull'economia circolare applicata al rifiuto: principali problematiche, prospettive e politiche di sviluppo, flussi e catene di valori.
- III. Nuove tecniche emergenti sui processi di riciclo/recupero.  
Analisi del ciclo di vita del rifiuto nel settore delle costruzioni mediante il supporto di progetti europei e casi studio tratti dalla letteratura.

La gestione adeguata dei rifiuti è un elemento essenziale per garantire l'efficienza delle risorse e una crescita sostenibile. Attualmente l'Europa è in una fase di transizione e punta ad un modello di crescita rigenerativo aumentando la percentuale di utilizzo dei materiali di ottica circolare.

Dall'analisi dei processi emergenti di recupero/riutilizzo si evince che una valutazione completa del ciclo di vita, applicata a un determinato rifiuto, può avere un impatto sul prodotto finale e sulla gestione nelle varie fasi di trattamento e di processo. I documenti di riferimento sulle migliori tecniche disponibili (BREF) dovrebbero essere accompagnati da una valutazione LCA se si vuole fornire un orientamento completo sulle migliori prassi di gestione dei rifiuti nei settori industriali.

Le tecniche dimostrative descritte per il settore delle costruzioni offrono una visuale sugli sviluppi tecnologici e sui potenziali benefici dati dall'introduzione delle azioni circolari in diverse fasi della catena del valore. I processi di recupero e le possibili applicazioni sono molteplici e seppure la trattazione non è esaustiva vi si possono scorgere le potenzialità e le tendenze verso cui il settore si sta dirigendo. Possibile supporto normativo è necessario per l'implementazione di queste nuove attività anche attraverso specifici percorsi di "end of waste" a sostegno delle fasi di recupero.

I materiali da costruzione recuperati mostrano generalmente un basso impatto ambientale, sono qualitativamente validi e durevoli. La mancata standardizzazione di dati e informazioni qualitative sull'intera catena del valore del prodotto è uno dei principali ostacoli e generano una percezione di qualità negativa.

I prodotti riciclati forniscono edifici facili da smontare, strutture flessibili, aggiornabili, riparabili e adattabili che ne prolungano la durata, con integrazioni di materiali ad alta resistenza e infrastrutture naturali. Al contempo i costi di elaborazione sono ragionevoli e c'è bisogno di personale qualificato.

Il settore della costruzione è solo uno delle numerose catene di valore in cui i processi di recupero e riciclo possono essere applicati. Il risultato mostra una serie di prodotti validi, tecnologici, innovativi, performanti capaci non solo di "ridar vita a degli scarti" ma di contribuire ad un nuovo modello sociale ed economico che sarà in grado, un giorno, di condurre il pianeta a una piena sostenibilità. Un risultato che merita sicuramente un approfondimento.



## BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

[1]"Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives (Text with EEA relevance)", 2008. [Online]. Available:

<https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/>. [Accessed: 13- Jun- 2019].

[2]"Waste statistics/it", Eurostat 2017. [Online]. Available:

[https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste\\_statistics/it](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics/it). [Accessed: 25- Sep- 2018].

[3]ISPRA, "Rapporti rifiuti speciali", ISPRA n. 285/2018, ISBN 978-88-448-0899-0, Roma, 2018.

[4]"Eurostat (env\_wasgen)", 2019. [Online]. Available:

[https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env\\_wasgen&lang=en](https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_wasgen&lang=en). [Accessed: 20- Nov- 2019].

[5]EUROPEAN COMMISSION, "Leading the way to a global circular economy: state of play and outlook", EN SWD(2020) 100 final, Brussels, 2020.

[6]OECD (2019), Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences, OECD Publishing, Paris, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>.

[7]COM(2020) 98 final, "A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe", CE, Brussels, 2020.

[Online]. Available: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2020:98:FIN&WT.mc\\_id=Twitter](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2020:98:FIN&WT.mc_id=Twitter)

[8]"Decision No 1386/2013/EU of the European Parliament and of the Council of 20 November 2013 on a General Union Environment Action Programme to 2020 'Living well, within the limits of our planet'", CE, 2020. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32013D1386>

[9]"Consolidated text: Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products (recast)", EC, 2009. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:02009L0125-20121204>

[10]"Eurostat - Tables, Graphs and Maps Interface (TGM) table", Ec.europa.eu, 2020. [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=en&pcode=t2020\\_rt130&plugin=1](https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=en&pcode=t2020_rt130&plugin=1). [Accessed: 21- May- 2020].

[11]Direttiva 2000/53/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 18 settembre 2000, relativa ai veicoli fuori uso. CE, 2000. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=celex:32000L0053>

[12]EUROSTAT, Waste statistics from EUROSTAT, data retrieved in January 2018.

[13]P. Di Lorenzo, A. Angelici, F. Di Matteo, M. Pinna and C. Tartaglione., Il "fine vita" dei prodotti nel sistema moda - Piano Formativo AV/81/A12 "GREENIES - Green Development of Fashion Industries, Fondimpresa, Roma, 2013.

[14]Margareta Wahlström, Jef Bergmans, Tuuli Teittinen, John Bachér, Anse Smeets, Anne Paduart, "Construction and Demolition Waste: challenges and opportunities in a circular economy", European Topic Centre on Waste and Materials in a Green Economy, 2020.

[15]"European Parliament and European Council, 2018, Directive (EU) 2018/851 of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste. Brussels, Belgium.", 2018.

[16]EC, 2015, The European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy (COM(2015) 614/2 of 2 December 2015), European Commission, Brussels, Belgium., 2020.

[15]Cristina Baiardi, Elisabetta Ciarini, "Le risorse idriche nell'ambito della circular economy", Intesa Sanpaolo - Direzione Studi e Ricerche - SRM, 2017.

[16]"Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy OJ L 327, 22.12.2000, p. 1-73", 2020.

[17]"Updated Report On Wastewater Reuse In The European Union", TYPASA-reference:7452, 2013. [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/environment/water/blueprint/pdf/Final%20Report\\_Water%20Reuse\\_April%202013.pdf](https://ec.europa.eu/environment/water/blueprint/pdf/Final%20Report_Water%20Reuse_April%202013.pdf)

[18]Antoine Pinasseau, Benoit Zerger, Joze Roth, Michele Canova, Serge Roudier; Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste treatment Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control); EUR 29362 EN; Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018; ISBN 978-92-79-94038-5, doi:10.2760/407967, JRC113018, 2018.

[19]Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) Text with EEA relevance OJ L 334, 17.12.2010, p. 17-119. 2010. [Online]. Available: <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/75/oj>

[20] WT TWG, *Comments to the second draft of the WT BREF (issued 2006)*, 2004

[21] Umweltbundesamt (AT), *Selected BAT Candidates and Emerging Techniques*, 2015

[22] Danish EPA, *Emerging Techniques - DK - biological treatment*, 2014

[23] Biological Subgroup, *Emerging techniques proposed by the TWG Subgroup on Biological treatments*, 2015.

- [24]"Horizon 2020", Horizon 2020 - European Commission. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en>. [Accessed: 22- Jan- 2020].
- [25]"Horizon 2020 Energy Efficiency data hub", Energy.easme-web.eu, 2020. [Online]. Available: <https://energy.easme-web.eu/>. [Accessed: 22- Jan- 2020].
- [26]"Horizon 2020 Environment and resources data hub", Sc5.easme-web.eu, 2020. [Online]. Available: <https://sc5.easme-web.eu/>. [Accessed: 22- Jan- 2020].
- [27]"CORDIS | European Commission | MADFORWATER", Cordis.europa.eu, 2020. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/688320>. [Accessed: 22- Jan- 2020].
- [28]"CORDIS | European Commission | RES URBIS", Cordis.europa.eu, 2020. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/730349/reporting>. [Accessed: 12- Jan- 2020].
- [29]"CORDIS | European Commission | SMART-Plant", Cordis.europa.eu, 2020. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/690323>. [Accessed: 08- Jan- 2020].
- [30]"CORDIS | European Commission | CIRC-PACK", Cordis.europa.eu, 2020. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/730423>. [Accessed: 05- Jan- 2020].
- [31]"CORDIS | European Commission | RE4", Cordis.europa.eu, 2020. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/723583/reporting>. [Accessed: 05- Jan- 2020].
- [32]"CORDIS | European Commission | RESLAG", Cordis.europa.eu, 2020. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/642067>. [Accessed: 11- Jan- 2020].

[33]M. Dastbaz, C. Gorse and A. Moncaster, Building Information Modelling, Building Performance, Design and Smart Construction.

[34]"CORDIS | European Commission | BAMB", Cordis.europa.eu, 2020. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/642384>. [Accessed: 15- Jan- 2020].

[35]"EU Construction and Demolition Waste Protocol and Guidelines - Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs - European Commission", Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs - European Commission, 2018. [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/growth/content/eu-construction-and-demolition-waste-protocol-0\\_en](https://ec.europa.eu/growth/content/eu-construction-and-demolition-waste-protocol-0_en). [Accessed: 22- Jan- 2020].

[36]"CORDIS | European Commission | HISER", Cordis.europa.eu, 2020. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/642085/reporting>. [Accessed: 22- Jan- 2020].

[37]S. Akçaözoğlu, K. Akçaözoğlu and C. Atiş, "Thermal conductivity, compressive strength and ultrasonic wave velocity of cementitious composite containing waste PET lightweight aggregate (WPLA)", Composites Part B: Engineering, vol. 45, no. 1, pp. 721-726, 2013. Available: 10.1016/j.compositesb.2012.09.012 [Accessed 14 January 2020].

[38]M. Whittaker et al., "Novel construction and demolition waste (CDW) treatment and uses to maximize reuse and recycling", Advances in Building Energy Research, pp. 1-17, 2019. Available: 10.1080/17512549.2019.1702586.

[39]A. Schackow, D. Stringari, L. Senff, S. Correia and A. Segadães, "Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars", Cement and Concrete Composites, vol. 62, pp. 82-89, 2015. Available: 10.1016/j.cemconcomp.2015.04.019.

[40]"Project description | re4.eu", Re4.eu, 2020. [Online]. Available: <http://www.re4.eu/project-description>. [Accessed: 22- Jan- 2020].