



IL METABOLISMO ANTROPOGENICO DEGLI ELEMENTI E LE POTENZIALITÀ DI RICICLO

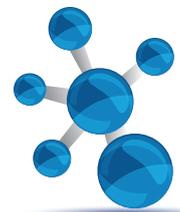
La moderna tecnologia impiega virtualmente tutti gli elementi stabili della tavola periodica, ma spesso vengono usati una sola volta. Per molti elementi, il riciclo a fine vita è inesistente, vincolando il progresso sulle sole fonti naturali. Un miglioramento nell'uso delle risorse richiede una comprensione approfondita del "metabolismo antropogenico" in uno sforzo congiunto tra politica, industria e ricerca.

Gli elementi della tavola periodica, che determinano e definiscono la composizione del nostro pianeta, sono comparsi in tempi remoti a seguito di esplosioni stellari, ma forgiati nella creatività umana ne hanno contraddistinto il progresso tecnologico nel corso dei secoli. Fino alla seconda metà del XIX secolo, solo una piccola parte degli elementi era comunemente utilizzata mentre, oggi, la moderna tecnologia impiega virtualmente tutti gli elementi stabili della tavola periodica [1]. In questo crescendo di complessità, la rivoluzione industriale è stata un punto di svolta nella storia dell'umanità che ha promosso la transizione verso un nuovo sistema di produzione basato su risorse naturali relativamente accessibili ed "illimitate". In realtà, buona parte di queste risorse erano presenti in Paesi spesso non direttamente coinvolti dalla rivoluzione industriale e, in molti casi, l'accesso al capitale naturale è stato motivato da un'espansione militare e ambizioni imperialistiche, ponendo le premesse per la corsa agli armamenti che anticipò la prima guerra mondiale.

Nei primi due decenni del XX secolo e dopo la fine della seconda guerra mondiale, il capitalismo ha portato ad un progressivo miglioramento della qualità della vita e del benessere, spesso in forma di beni materiali. Tuttavia, condotto all'estremo, il capitali-

simo consumistico ha creato disuguaglianze e aspettative di una crescita infinita basata su un modello lineare di produzione e consumo, conosciuto con il nome di economia lineare o *take-make-dispose*, che ha mantenuto inalterate le proprie caratteristiche fino ad oggi, sebbene si siano sollevate nel tempo esortazioni crescenti per un uso più sostenibile del capitale naturale. I limiti di questo modello sono diventati particolarmente evidenti in anni recenti quando la domanda di risorse naturali e i relativi impatti ambientali sono aumentati a livelli insostenibili [2].

In questo contesto, il recupero di materia e il riciclo a fine vita sono spesso indicate come strategie chiave per diversificare l'accesso a risorse essenziali per la società moderna. In un modello di economia circolare [3], contrapposto a quello lineare, le fonti di materie prime seconde, conosciute anche come riserve antropogeniche, riserve in uso o miniere urbane [4], possono assicurare una fonte sostenibile di risorse all'industria e rendere circolari i cicli antropogenici di materia. Allo stesso tempo, il riciclo è volto a ridurre l'uso di energia e materia associati alla produzione primaria e i relativi impatti all'ecosistema. Gli impatti ambientali associati alla produzione primaria dei metalli sono ridotti considerevolmente quando la materia in input proviene da riciclo. Ad esempio, si stima



che, a seconda del metallo e della tipologia di rottame, il riciclo permetta di ridurre dal 50% al 95% dei consumi energetici associati alla produzione primaria [5]. Parte di questo credito energetico è eroso per la raccolta e la lavorazione, ma i benefici ambientali derivanti dalla circolarità dei materiali sono spesso riconosciuti, su scala globale, nell'ambito del contrasto al cambiamento climatico, con l'industria dei metalli che rappresenta circa l'8% della domanda globale di energia e il 6% delle emissioni totali di gas climalteranti [6].

L'interconnessione (*nexus*) tra uso dei metalli, energia e cambiamento climatico si intensifica per effetto delle politiche globali a supporto di tecnologie "verdi" per la produzione di energia come turbine eoliche e pannelli fotovoltaici. Se da un lato queste soluzioni consentono di ridurre drasticamente l'emissione di CO₂-eq per unità di energia generata, dall'altro vincolano il nostro sviluppo su risorse considerate "critiche". Per un ampio spettro di risorse naturali come le terre rare sussiste un elevato rischio associato a interruzioni nell'approvvigionamento a causa di depositi concentrati in aree geopoliticamente instabili, un progressivo impoverimento ed esaurimento dei giacimenti naturali, produzioni energeticamente intensive, interconnesse e monopolistiche, mancanza di materiali alternativi e una volatilità dei prezzi di mercato che sollevano preoccupazioni riguardo ad una domanda sostenibile e duratura [1, 7, 8].

La domanda di risorse e il "metabolismo antropogenico"

L'interesse crescente volto a comprendere gli effetti dell'attività umana sull'ambiente ha portato alla consapevolezza del valore delle risorse naturali per l'uomo sotto forma di materiali ed energia per rispondere a bisogni essenziali e alla necessità di migliorare la conoscenza del "metabolismo antropogenico" che caratterizza la società moderna. Questo flusso metabolico comincia con l'estrazione di risorse naturali (a bassa entropia) e termina con la generazione di rifiuti e scarti (ad alta entropia) smaltiti nell'ecosistema.

Se i flussi di materia ed energia che interessano le fasi di estrazione e successiva lavorazione sono generalmente dettagliati nelle statistiche di produzione, database e inventari nazionali o misurabili direttamente *in situ*, l'informazione riguardante l'accumulo di risorse nelle riserve antropogeniche e il flusso to-

tale generato a fine vita sono raramente noti. Tuttavia, questa condizione necessaria per la definizione di strategie virtuose per la gestione delle risorse può essere stimata attraverso un'analisi del ciclo antropogenico di un determinato elemento in funzione dell'andamento storico dell'immesso a consumo e del tempo di residenza in uso, distinti per principali settori di applicazione. Nell'analisi dei flussi di materia (*material flow analysis*), il principio di conservazione della massa è applicato a una determinata sostanza o materiale per identificarne e quantificarne flussi e riserve in un sistema definito nello spazio (ad esempio, un Paese, una regione o l'intero pianeta) e nel tempo (per uno o più anni) [8].

Un diagramma del ciclo antropogenico di un metallo generico è mostrato in Fig. 1. Il minerale primario (vergine) entra nel ciclo dall'angolo in basso a sinistra (estrazione), procede da una fase all'altra (raffinazione, manifattura, uso) e termina all'angolo in basso a destra in corrispondenza della gestione a fine vita. Se la circolarità è raggiunta, il metallo recuperato rientra in circolo per usi successivi. Il flusso 1 costituisce il minerale metallifero concentrato dopo i processi di frantumazione e flottazione. Il flusso 2 rappresenta il

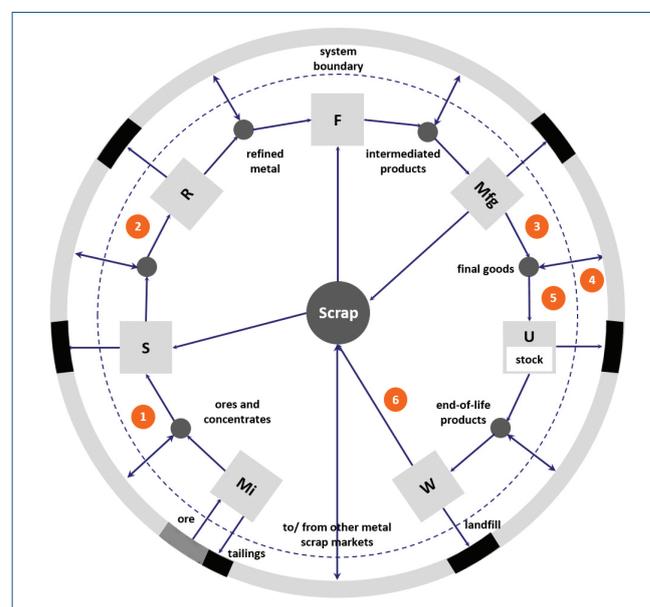


Fig. 1 - Il ciclo antropogenico di un metallo generico. Il minerale primario (*ore*) entra nel ciclo dall'angolo in basso a sinistra, procede da una fase all'altra (raffinazione, manifattura, uso) e termina all'angolo in basso a destra in corrispondenza della gestione a fine vita. Se la circolarità è raggiunta, il metallo recuperato rientra in circolo per usi successivi. Mi - mining; S - smelting; R - refining; F - fabrication; Mfg - manufacturing; U - use; W - waste management (fonte: [9])

metallo non raffinato forgiato nel processo di *smelting*, seguito da raffinazione, manifattura di semi-lavorati e prodotti finiti. Il flusso di prodotti creati in un sistema (3) può sommarsi o sottrarsi al flusso 4, che rappresenta la quantità di un elemento contenuto in materiali e prodotti importati o esportati. I flussi 3 e 4 si combinano determinando l'impresso a consumo (apparente) nel sistema. Infine, il flusso 6 è la quantità di metallo riciclato e reimmesso nel ciclo antropogenico. In un sistema completamente circolare, il flusso 6 dovrebbe eguagliare il flusso 5 [9].

Le inefficienze di produzione e gestione a fine vita limitano significativamente il flusso riutilizzabile, recuperabile e riciclabile degli elementi. In teoria, i metalli sono infinitamente riciclabili, ma in pratica, il riciclo è spesso inefficiente o inesistente. Ad esempio, si stima che ogni unità di nichel estratta dal suolo abbia un tempo di residenza nell'antroposfera di circa 70 anni per effetto di tempi di vita relativamente lunghi in applicazioni siderurgiche. Tuttavia, in quest'arco temporale, ogni unità di nichel è reimmessa nel ciclo antropogenico (cioè riciclata) in media solo circa tre volte prima di essere completamente persa [10]. Nel caso del rame, ad un tempo di residenza di poco inferiore (60 anni) corrisponde un numero massimo di sequenze di riciclo pari a due [11]. Efficienze di processo variano da Paese a Paese e da metallo a metallo, con il risultato che in determinati casi il numero di cicli potrebbe essere superiore alle stime globali menzionate per nichel e rame. Tuttavia, positive e significative variazioni appaiono improbabili, indebolendo "il mito dell'infinita riciclabilità" dei metalli.

Scarti e residui di lavorazione sono spesso reinseriti nel processo che li ha generati (*home scrap*) o inviati a processi di rifusione e raffinazione prima di un loro riuso (*new scrap*). La generazione di *home scrap* e *new scrap* è una conseguenza delle inefficienze in fase di produzione e manifattura, pertanto un loro riciclo, sebbene generalmente vantaggioso dal punto di vista economico e relativamente semplice da quello tecnico/tecnologico, non determina una riduzione nella domanda di risorse primarie né degli impatti ad esse associati.

Nel caso di scarti generati a fine vita (*old scrap*), invece, l'elemento da recuperare e riciclare è contenuto in prodotti obsoleti e rifiuti, richiedendo maggiori sforzi per un'efficiente separazione e recupero, ma il recupero di *old scrap* costituisce una fonte alter-

nativa che permette di ridurre la dipendenza da materie prime. Sebbene diverse metriche siano state proposte in letteratura, un ampio consenso definisce l'efficienza di riciclo a fine vita (*end-of-life recycling rate*) come la frazione di metallo riciclato rispetto al totale generato a fine vita. L'efficienza così definita comprende le fasi di raccolta, separazione, recupero e "riciclo funzionale" di un determinato elemento. Per riciclo funzionale si intende un riciclo in cui le proprietà fisiche e chimiche del metallo sono preservate negli usi successivi [5].

Al contrario, nel riciclo non-funzionale il metallo è perso come elemento in tracce o impurezza in cicli di altre risorse. Sebbene quest'ultima possibilità prevenga in molti casi un rilascio diretto nell'ambiente della sostanza, il riciclo non-funzionale costituisce a tutti gli effetti una perdita di materia. Un esempio è rappresentato dalla presenza del rame nei flussi secondari (riciclati) di acciaio. In molti casi, la presenza di impurezze richiede una diluizione per ridurre gli effetti sulle proprietà chimico-fisiche del materiale riciclato con conseguente incremento della domanda di risorse primarie e degli impatti ambientali connessi [12].

In Fig. 2 sono riportati i cicli antropogenici di ferro (a), alluminio (b) e rame (c) in Europa. In generale, l'Europa ha una rete industriale consolidata per i tre metalli che copre le principali fasi del ciclo di vita,

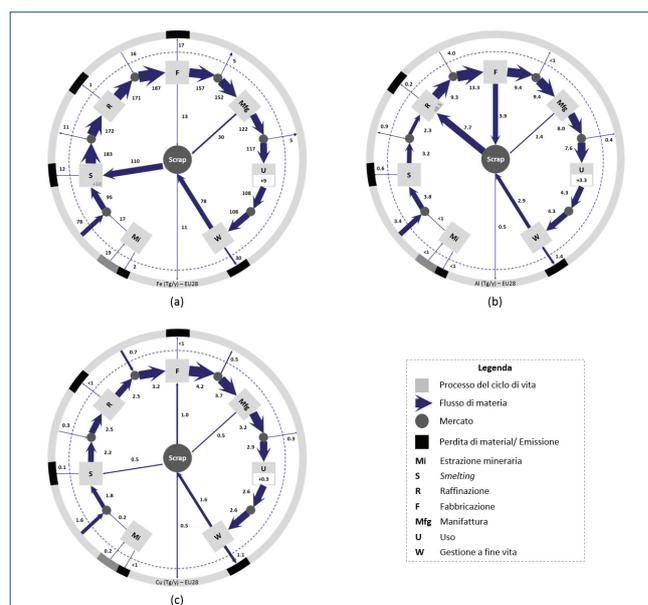
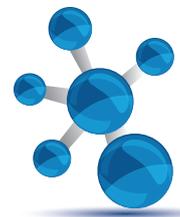


Fig. 2 - Il ciclo antropogenico di ferro (a), alluminio (b) e rame (c) in Europa [13]



dall'estrazione alla gestione a fine vita. Tuttavia, le risorse naturali domestiche non sono sufficienti per soddisfare la domanda di materiale primario, rendendo gli Stati membri fortemente dipendenti dalle importazioni estere. Ferro, alluminio e rame sono i principali metalli per volumi di produzione e i loro settori di applicazione hanno tempi di vita relativamente lunghi, determinando un rapido accumulo di risorse antropogeniche nelle riserve in uso. Un recente studio ha stimato l'estensione delle miniere urbane in Europa in circa 5.300 Tg

di ferro (pari a circa 10 tonnellate/abitante), 130 Tg di alluminio (260 kg/abitante) e circa 70 Tg di rame (140 kg/abitante). Per quest'ultimo, la riserva antropogenica contiene circa una quantità doppia di rame rispetto ai depositi naturali in Europa [13].

L'industria del riciclo integra l'approvvigionamento da fonti primarie con flussi di materiale riciclato. In particolare, le efficienze di riciclo a fine vita per i tre metalli sono discrete (75% per il ferro, 69% per l'alluminio, 61% per il rame), ma lontane da un "riciclo perfetto". In aggiunta, non tutto l'*old scrap* raccolto e trattato a fine vita è riciclato in Europa, ma il flusso di risorse secondarie esportate dalla regione verso mercati asiatici è in continuo aumento. Infine, le inefficienze durante il trattamento a fine vita causano significative perdite di materia e impediscono una chiusura dei cicli antropogenici [14].

I limiti al riciclo e le soluzioni per un uso efficiente delle risorse

Se per ferro, alluminio e rame, forse i tre elementi che più hanno caratterizzato l'ossatura dello sviluppo umano in epoca moderna, l'efficienza di riciclo funzionale a fine vita è apprezzabile ma lontana da un riciclo ideale, cosa aspettarsi per gli altri elementi? La Fig. 3 mostra una tavola periodica con circa 60 elementi colorati in funzione dell'efficienza di riciclo a fine vita [5]. Elementi appartenenti ad uno stesso gruppo chimico sono spesso impiegati in applicazioni simili e, di conseguenza, similarità emergono più tra elementi di uno stesso gruppo che di uno stesso periodo, con qualche eccezione. È bene notare

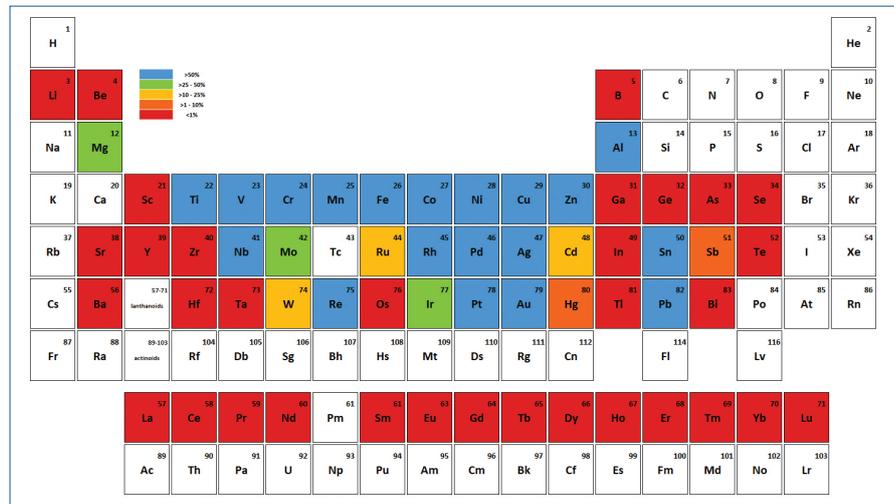


Fig. 3 - Efficienze di riciclo funzionale a fine vita [15]

che l'intervallo più alto individua le efficienze di riciclo superiori al 50%. Oltre ai già citati ferro, alluminio e rame, per i principali metalli in uso e gli elementi utilizzati nelle loro leghe un'industria del riciclo è ben sviluppata, distribuita globalmente ed in grado di riciclare più del 50% del totale generato a fine vita. A questa prima selezione, si aggiungono i metalli il cui valore economico è un fattore trainante nel loro recupero a fine vita come nel caso di rodio, palladio, argento, iridio, platino e oro.

Per gli elementi restanti, invece, il riciclo funzionale a fine vita è spesso marginale o, in molti casi, addirittura inesistente. Appartiene a questa selezione la quasi totalità degli elementi entrati significativamente in uso solo di recente come terre rare e metalli per usi speciali, il cui utilizzo, tuttavia, in basse concentrazioni in materiali e prodotti ne sfavorisce spesso il riciclo per ragioni di economia di scala. Ad esempio, la domanda di indio è guidata da applicazioni *high-tech* che richiedono le speciali caratteristiche chimico-fisiche di questo elemento. In particolare, nell'industria dei semiconduttori l'ossido di stagno e indio è la forma principale impiegata nella manifattura di pannelli e schermi a cristalli liquidi dai quali, però, non è al momento recuperato. Lo sviluppo di processi di separazione per l'indio da prodotti di elettronica obsoleti è in essere e, se economicamente sostenibile, potrebbe portare a una chiusura dei flussi di materia per un elemento geologicamente scarso [16].

Il potenziale di riciclo dipende dalle azioni intraprese in ciascuna fase del ciclo di vita. I limiti, tuttavia, sono imposti da abitudini e comportamenti sociali, proget-

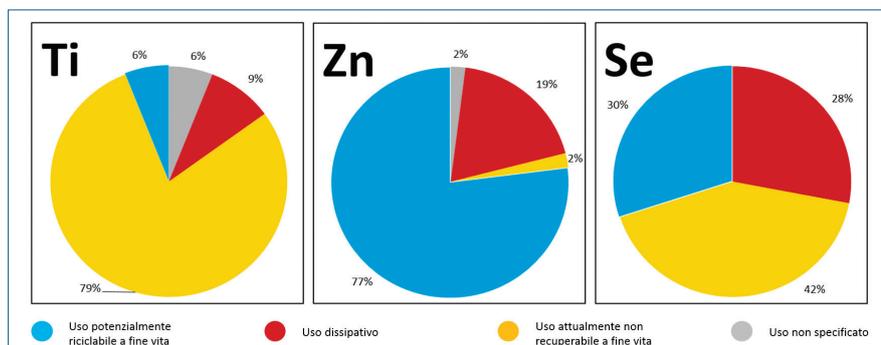


Fig. 4 - Distribuzione percentuale tra usi dissipativi, applicazioni attualmente non recuperabili a fine vita e potenzialmente riciclabili per titanio (Ti), zinco (Zn) e selenio (Se). Reprinted with permission from [17]. Copyright 2015, American Chemical Society

tazione di materiali e prodotti, tecnologie di riciclo, limiti economici e termodinamici.

Per molti elementi, l'utilizzo in applicazioni intrinsecamente dissipative determina una perdita di materia durante la fase d'uso che impedisce azioni di raccolta e recupero. Esempi includono applicazioni in agricoltura, medicina e farmacia, anodi sacrificali e protezioni galvaniche, usi militari, perdite per corrosione e frizione. Può sorprendere che, in molti casi, l'utilizzo degli elementi in usi dissipativi o (attualmente) non riciclabili rappresenti più del 50% dell'immesso a consumo, fornendo una misura del grado di insostenibilità nell'uso di materiali e prodotti e rendendo prioritario un utilizzo efficiente delle risorse (Fig. 4) [17]. Strategie virtuose come "Riduci, riusa, ricicla", "More with Less", e una dematerializzazione di beni e servizi possono contribuire ad una gestione sostenibile di materiali e prodotti attraverso un approccio che idealmente offre prodotti con un ridotto fabbisogno di risorse e minori impatti ambientali. Questa strategia è stata dibattuta a lungo in merito agli elementi usati in grandi quantità, ma le soluzioni appaiono complesse quando il mancato recupero è riconducibile alla dispersione in beni e servizi. La continua miniaturizzazione di prodotti e nanomateriali suggeriscono, forse, che il recupero e riciclo degli elementi possa essere ancora più problematico negli anni a venire [18].

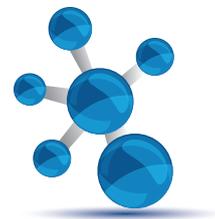
Anche nel caso di applicazioni potenzialmente riciclabili, però, sussiste un divario tra riciclo potenziale e riciclo effettivo. Pigmenti, catalizzatori e additivi chimici coprono un'ampia gamma di usi in cui molti elementi sono persi. Ne sono un esempio, l'impiego del selenio nella produzione di vetri colorati, l'uso del cadmio in ceramica e nei polimeri, o l'impiego di catalizzatori a base di germanio intenzionalmente in-

trappolati (e persi) durante la manifattura di bottiglie in PET per la loro capacità di conferire trasparenza e brillantezza all'imballaggio [16].

La termodinamica costituisce un'ultima limitazione alla separazione per effetto di simili comportamenti termodinamici dei leganti metallici che rendono la loro separazione estremamente energivora e, di fatto, impraticabile. La ripartizione degli elementi in fasi diverse durante la lavorazione metallurgica

determina spesso la possibilità o l'impossibilità di separare e recuperare i singoli elementi [19]. Nel caso dell'alluminio, ad esempio, la rimozione delle impurezze è spesso problematica e limita i processi di riciclo alla sola pressofusione, i cui prodotti hanno principale impiego nell'industria automobilistica. Il riciclo funzionale a fine vita per l'alluminio è relativamente efficiente, supportando l'ipotesi di una significativa disponibilità di alluminio secondario potenzialmente riciclabile. Tuttavia, interrogativi riguardano la possibilità di assicurare una domanda sufficiente a questi flussi di alluminio secondario, delineando un possibile paradosso che vede, da un lato, una grande disponibilità di alluminio secondario e, dall'altro, una richiesta di mercato non sufficientemente ampia [20]. Diventa quindi prioritario lo sviluppo su scala industriale di tecnologie dedicate alla separazione individuale di rottami di leghe simili o compatibili con un riciclo "chiuso", ovvero mirato al riutilizzo della lega nella stessa applicazione per cui era stata inizialmente forgiata [21].

La possibilità di materiali alternativi può ridurre la domanda di elementi critici e, quindi, la dipendenza da risorse naturali. Un candidato promettente è, ad esempio, il grafene, una cui applicazione su larga scala permetterebbe di sostituire una porzione importante di rame destinato alla conduzione elettrica. Tuttavia, la ricerca di materiali alternativi è tradizionalmente condotta su base elementare. Ovvero, quando aspetti economici, ambientali o strategici (ad esempio, un rischio alto di approvvigionamento) diventano insostenibili, l'approccio più comune è quello di guardare ad alternative che possano sostituire quel dato elemento ad un costo ambientale o economico inferiore. Questo approccio ha contri-



buito a ridurre o eliminare l'uso di sostanze tossiche, ma molto spesso ha fallito nel ridurre le perdite di materia spostando il problema da un elemento all'altro. Ad esempio, lo zinco è stato sostituito dal titanio nei pigmenti con il risultato che, oggi, circa l'80% del titanio immesso a consumo è perso senza possibilità di recupero (Fig. 4) [17].

Produzione e manifattura costituiscono le fasi in cui le scelte intraprese (Quali materiali usare? Come assemblarli?) abbiano effetti duraturi sui cicli di vita di materiali e prodotti. Appare, quindi, evidente che si trovi nella progettazione il luogo in cui le azioni più efficaci possano essere intraprese per evitare, o quantomeno ridurre, inefficienze nel metabolismo antropogenico. In questo senso, si auspica il passaggio a strategie che riflettano una maggior attenzione ad un uso sostenibile delle risorse in cui sia il recupero, e non la perdita, ad essere "intenzionale". Ragioni economiche sono spesso il limite ultimo di un mancato riciclo, ma è anche vero che quelle stesse ragioni, finora, hanno supportato un progresso tecnologico in cui ogni elemento della tavola periodica è essenziale ma spesso usato una sola volta [18]. Strategie come *design for recycling*, *design for environment*, *design for resource efficiency* miglioreranno la sostenibilità a lungo termine di materiali e risorse essenziali per la moderna tecnologia, ma richiedono uno sforzo "di sistema" in cui politiche, ricerca e industria ne permettano un'ampia adozione nei modelli attuali e futuri di produzione e consumo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] T.E. Graedel *et al.*, *PNAS*, 2015, **112**(14), 4257.
- [2] W. Steffen *et al.*, *Science*, 2015, **347**(6223), 1259855.
- [3] Ellen MacArthur Foundation, *Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*, Ellen MacArthur Foundation, Cowes, U.K., 2013.
- [4] R. Clift, A. Druckman (Eds.), *Taking stock of Industrial Ecology*, Springer, ISBN 978-3-319-20571-7, 2016.
- [5] T.E. Graedel *et al.*, *J. Ind. Ecol.*, 2011, **15**(3), 355.
- [6] P. Nuss, M.J. Eckelman, *PLoS ONE*, 2014, **9**(7), e101298.
- [7] European Commission, *Study on the review of the list of Critical Raw Materials*, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017.
- [8] P.H. Brunner, H. Rechberger, *Handbook of Material Flow Analysis*, CRC Press LLC, United States, 2004.
- [9] T.E. Graedel *et al.*, *Resources*, 2019, **8**(1), 32.
- [10] M.J. Eckelman *et al.*, *J. Ind. Ecol.*, 2012, **16**(3), 334.
- [11] M.J. Eckelman, I. Daigo, *Ecol. Econ.*, 2008, **67**(2), 265.
- [12] J.M. Allwood, J.M. Cullen, *Sustainable Materials - With both open eyes open*, Cambridge: UIT Cambridge, 2012.
- [13] F. Passarini *et al.*, *Material Flow Analysis of Aluminium, Copper and Iron in the EU-28*, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018.
- [14] L. Ciacci *et al.*, *Resources*, 2016, **6**(1), 6.
- [15] United Nations Environment Programme, *Recycling Rates of Metals - A Status report. A report of the working group on the global metal flows to the International Resource Panel*. UNEP, 2011.
- [16] L. Ciacci *et al.*, *J. Ind. Ecol.*, 2019, **23**(2), 426.
- [17] L. Ciacci *et al.*, *Environ. Sci. Technol.*, 2015, **49**(16), 944.
- [18] B.K. Reck, T.E. Graedel, *Science*, 2012, **337**(6095), 690.
- [19] T. Hiraki *et al.*, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 2011, **12**, 035003.
- [20] A.N. Løvik *et al.*, *Environ. Sci. Technol.*, 2014, **48**, 4257.
- [21] H. Hatayama *et al.*, *Mater. Trans.*, 2009, **50**(3), 650.

Anthropogenic Metabolism of the Elements and Potential for Recycling

Modern technology virtually uses almost all stable elements of the periodic table, but very often only once. For many elements, recycling at end-of-life is non-existent, constraining our progress solely on primary material sources. Improving efficiency in the use of resources requires increased understanding of the "anthropogenic metabolism" in a joint effort between policy, industry and research.