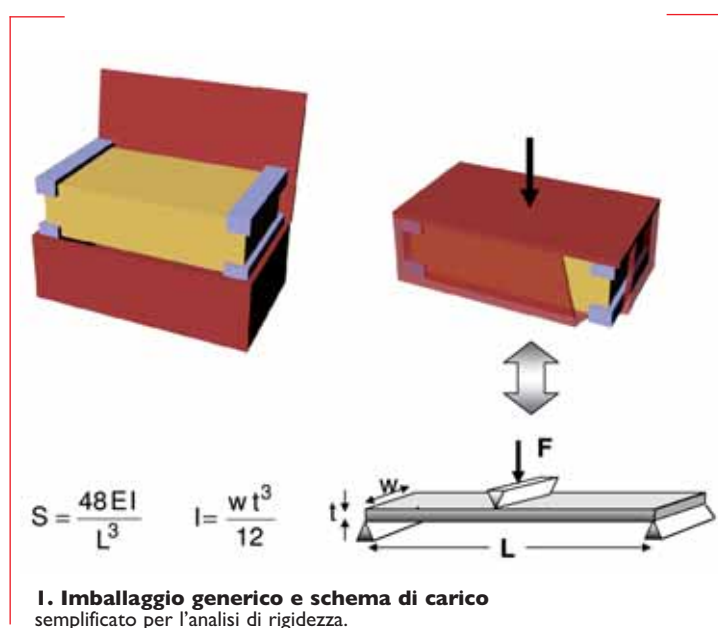


Sviluppo di imballaggi eco-sostenibili



Un'efficace gestione
dei requisiti
per una progettazione
eco-sostenibile degli imballaggi
deve consentire di operare
scelte che tengano conto
implicitamente dei vari aspetti
in gioco, e dei conflitti
potenziali.

Come si delinea
un'impostazione metodologica
che prevede un approccio
completo al ciclo di vita
dell'imballaggio

Nel precedente articolo, pubblicato sul n. 325 di *Progettare*, è stata discussa la complessità del problema progettuale nella concezione e nello sviluppo di imballaggi che tengano conto delle ricadute ambientali ad essi associabili. Sulla base di un'analisi dei requisiti di progetto che possono favorire le strategie ambientalmente più efficienti (riduzione quantitativa, riutilizzo, recupero), è stato evidenziato come tale problema debba tenere conto di una gamma ampia e diversificata di requisiti, e che la loro gestione ef-

ficiente diviene il fattore chiave di successo dello sviluppo del progetto.

Un'efficace gestione dei requisiti per una progettazione eco-sostenibile degli imballaggi deve consentire di operare scelte che tengano conto implicitamente dei vari aspetti in gioco, e dei conflitti potenziali. Si delinea allora un'impostazione metodologica che prevede: l'analisi delle scelte di progetto in relazione all'unità di funzione svolta (unità funzionale), che per la specifica tipologia di prodotto è riconducibile general-

mente al volume contenuto dall'imballaggio; l'integrazione dei requisiti convenzionali (legati alle funzionalità primarie di protezione, contenimento, movimentazione) con quelli ambientali, nello sviluppo degli strumenti e delle metriche che guidano il progettista nelle scelte sulle variabili di progetto; un approccio completo al ciclo di vita dell'imballaggio, e l'estensione del concetto di impatto ambientale (che nella pratica più comune risulta essere circoscritto alla quantità di rifiuti generati, oltre che alle ricadute dell'utilizzo di sostanze inquinanti o tossiche); un'accurata analisi delle conseguenze che le scelte di progetto hanno sull'impatto ambientale dell'imballaggio nel suo intero ciclo di vita (oltre che sulla sostenibilità economica e sull'efficienza funzionale dell'imballaggio).

Con queste premesse, si presentano a seguire due approcci diversi ma complementari di progettazione integrata, che interpretano queste esigenze.

Approccio integrato alla scelta ottimale del materiale

La scelta ottimale dei materiali è uno dei fattori chiave della progettazione. Se strutturata in maniera adeguata può essere operata tenendo conto implicitamente dei parametri geometrici significativi e ricercando il soddisfacimento di varie tipologie di requisiti, trattati come obiettivi o come vincoli della scelta [Ashby 2005]. Considerando un generico imballaggio del tipo più comune, rappresentato in figura 1, e focalizzando l'attenzione sul contenitore esterno, è possibile impostare la scelta del materiale tenendo conto dei seguenti requisiti: protezione del prodotto racchiuso dall'imballaggio; efficienza peso-ingombro dell'imballaggio; sostenibilità economica; impatto ambientale contenuto. I primi due requisiti, che sono legati alla funzionalità primaria dell'imballaggio (protezione del contenuto, col minore peso e ingombro dell'imballaggio stesso), possono essere trattati rispettivamente come un vincolo da imporre nella scelta del materiale ottimale, e l'obiettivo da raggiungere. Traducendo la capacità protettiva dell'imballaggio

nella sua rigidità, essa deve essere tale da contenere le deformazioni dovute ad eventuali forze applicate esternamente, accidentali o conseguenti a movimentazione e trasporto. Riconducendo il problema strutturale allo schema di carico su un pannello descritto nella parte inferiore di figura 1, e considerandolo riferito alla superficie esterna dell'imballaggio di maggiore estensione (e quindi più critica dal punto di vista del comportamento deformativo), il vincolo di rigidità può essere espresso mediante la:

$$S = \frac{48EI}{L^3} \quad \text{con} \quad I = \frac{wt^3}{12} \quad (1)$$

dove S è la rigidità richiesta al pannello (rapporto tra la forza applicata e lo schiacciamento massimo consentito in corrispondenza al punto di applicazione della forza), E è il modulo di Young, I è il momento di inerzia della sezione del pannello, e gli altri termini sono i parametri geometrici specificati in figura.

Considerando come primo obiettivo il contenimento dell'ingombro, esso può essere tradotto nella minimizzazione dello spessore t dell'imballaggio, che dalle (1) può essere espresso come:

$$t = \left(\frac{SL^3}{4Ew} \right)^{1/3} \propto \frac{1}{E^{1/3}} \quad (2)$$

La relazione di proporzionalità tra t e $1/E^{1/3}$ messa in evidenza nella (2), indica che a parità di rigidità e degli altri parametri geometrici fissi (w e L dipendono dall'ingombro del contenuto dell'imballaggio), lo spessore dipende dal modulo di Young E del materiale, secondo la funzione $1/E^{1/3}$.

Analogamente, considerando come secondo obiettivo il contenimento del peso, esso può essere tradotto nella minimizzazione della massa m dell'imballaggio. Considerando ancora le (1), tale massa può essere espressa come:

$$m = wtL\rho = \left(\frac{S w^2}{4} \right)^{1/3} L^2 \left(\frac{\rho}{E^{1/3}} \right) \propto \frac{\rho}{E^{1/3}} \quad (3)$$

A parità di rigidità e dei parametri geometrici fissi (w, L), la massa dipende dalla densità ρ e dal modulo di Young E del materia-

le, secondo la funzione $\rho/E^{1/3}$.

I materiali le cui proprietà sono tali da minimizzare le due funzioni $1/E^{1/3}$ e $\rho/E^{1/3}$, dette *indici di prestazione*, consentono quindi di ridurre lo spessore dell'imballaggio e il suo peso.

Dal secondo indice di prestazione, individuato nella (3), è possibile derivare altri due indici che possono guidare il progettista nella scelta del materiale in relazione agli altri due requisiti in gioco (costo e impatto ambientale contenuti):

$$C \propto \frac{C_m \rho}{E^{1/3}} \quad CE \propto \frac{CE_m \rho}{E^{1/3}} \quad (4)$$

Il primo indice esprime il fattore di proporzionalità col quale varia il costo del materiale necessario a realizzare l'imballaggio (C_m è il costo unitario del materiale), e quindi è una metrica della sostenibilità economica della scelta del materiale.

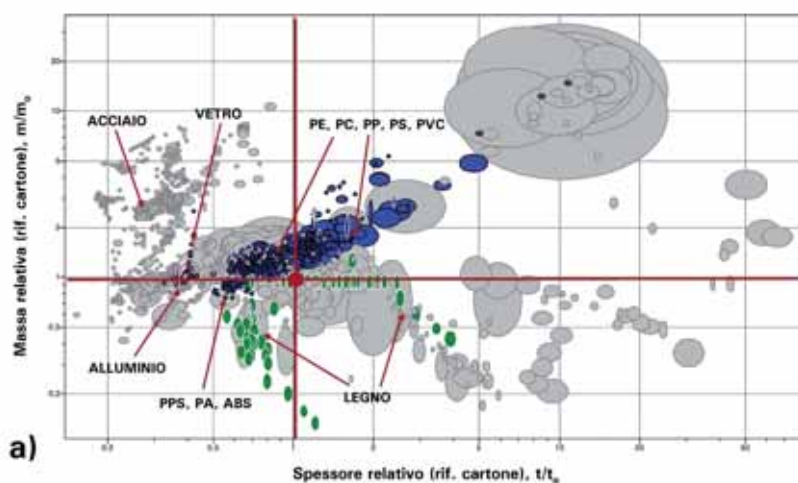
Analogamente il secondo indice, derivato anch'esso dall'indice di minimizzazione della massa, esprime il fattore di proporzionalità col quale varia il costo energetico del materiale necessario a realizzare l'imballaggio (CE_m è il costo energetico unitario del materiale). Esso quindi consente di indagare il contenimento di un aspetto specifico dell'impatto ambientale, legato al consumo energetico.

La scelta di questo particolare indicatore di impatto è molto diffuso, ed è anche facilmente riconducibile all'emissione di CO₂ associata alla produzione dell'imballaggio [Hekkert et al., 2000].

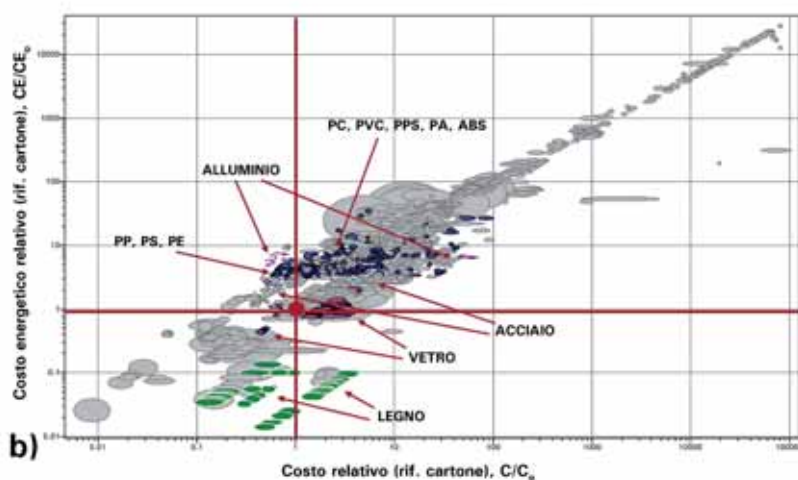
Per evidenziare l'efficacia di questo approccio alla scelta del materiale, è possibile ricondurre gli indici di prestazione al confronto con un materiale di riferimento M_o . In questo caso dalle (2) e (3) si ottengono le seguenti espressioni:

$$\frac{t}{t_o} = \left(\frac{E_o}{E} \right)^{1/3} \quad \frac{m}{m_o} = \left(\frac{\rho}{E^{1/3}} \right) \cdot \left(\frac{E_o^{1/3}}{\rho_o} \right) \quad (5)$$

Queste due metriche esprimono la variazione di spessore e massa, al variare del materiale, rispetto alla soluzione di riferimento (cui corrispondono i termini contrassegnati col pedice o), a parità di rigidità e di parametri geometrici fissi. In maniera analoga,



a)



b)

Software:
Cambridge Engineering Selector 2006

2. Scelta integrata dei materiali mediante analisi della rispondenza ai requisiti:

a) Metriche per la funzionalità primaria; b) Metriche per la sostenibilità economica e ambientale.

può essere una buona soluzione alternativa, ma solo in alcuni suoi formati contiene il costo, e in tutti i casi comporta un maggiore impatto dovuto al costo energetico. Il vetro, che stando all'analisi delle metriche proposte potrebbe essere una valida soluzione, non è adatta al tipo di applicazione presa in esame, in quanto fragile. Tra le materie plastiche, quelle più interessanti dal punto di vista della funzionalità primaria (Pps, PA, Abs) comportano costi e impatti energetici elevati. Infine una soluzione in acciaio può essere presa in considerazione solo nel caso in cui la riduzione dello spessore sia determinante, poiché rispetto alle altre metriche essa sarebbe inefficiente.

Progettazione del ciclo di vita dell'imballaggio

L'approccio integrato alla scelta del materiale descritto in precedenza consente di gestire parametri di progetto di diversa natura (materiali, parametri geometrici), tenendo conto di varie tipologie di requisiti, come quelli indagati: requisiti funzionali (efficienza peso-ingombro dell'imballaggio), economici, ambientali (riduzione quantitativa, contenimento dell'impatto energetico). Esso inoltre consente l'ampliamento del set di requisiti, introducendone di nuovi sotto forma di obiettivi e vincoli di progetto.

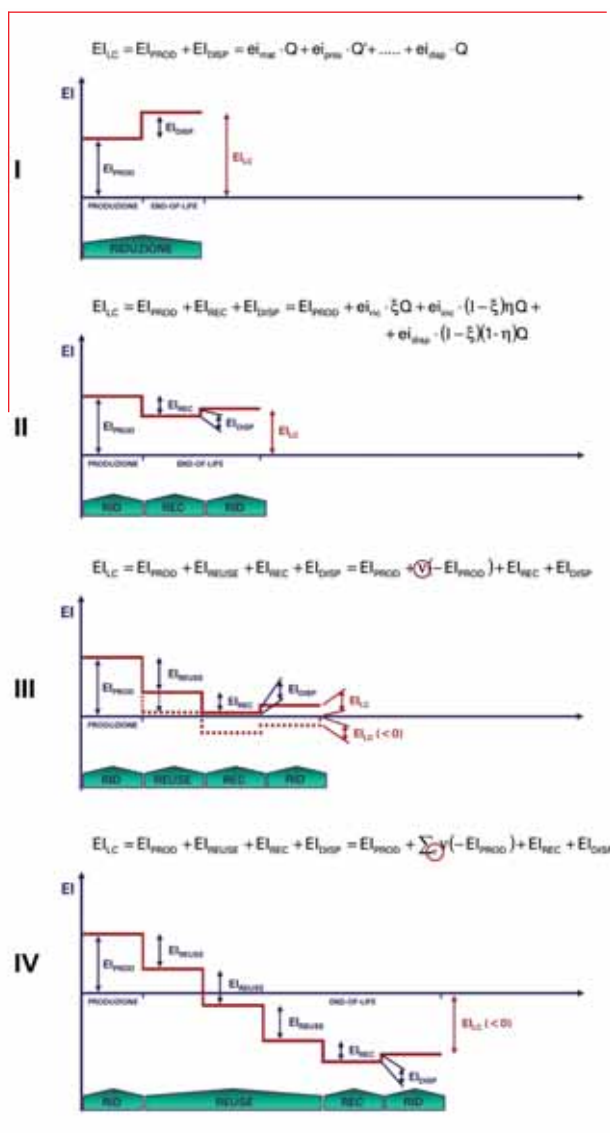
Anche se questo approccio è efficace dal punto di vista progettuale, esso presenta una chiara limitazione nella portata dell'indagine ambientale, dovuta al fatto che le valutazioni sono limitate all'impatto relativo alla sola produzione del materiale [Giudice et al., 2005]. Esso può essere quindi complementare a un approccio più completo, che tenga conto in maniera organica delle diverse implicazioni ambientali di un prodotto sull'ambiente, riconducibili a tutti i processi costituenti il suo ciclo di vita che scambiano sostanze o energia con l'ecosfera, e riassumibili in tre tipo-

dalle (4) è possibile ottenere le metriche C/C_0 e CE/CE_0 .

Le metriche così ottenute possono essere utilizzate per indagare le varie classi di materiali potenzialmente impiegabili nella realizzazione di imballaggi. Il grafico in figura 2a classifica varie tipologie presenti in commercio di alluminio, acciaio, vetro, plastiche e legno, rispetto alle due metriche (5), espressione dei requisiti legati alla funzionalità primaria dell'imballaggio, e considerando come materiale di riferimento M_0 un cartone rigido da imballaggio. In questo tipo di grafico il materiale di riferimento è chiaramente posizionato in corrispondenza al punto in cui le metriche assumono valore unitario. I materiali che in virtù delle loro proprietà si attestano nel quadrante in basso a sinistra so-

no tali da ridurre sia lo spessore che la massa dell'imballaggio rispetto alla soluzione in cartone, pur garantendo la medesima rigidità. Negli altri quadranti si posizionano materiali che migliorano uno dei due parametri a discapito dell'altro, o che se impiegati al posto del cartone comporterebbero sia un incremento in volume che in peso, per garantire la stessa rigidità. Analogamente, mediante il grafico in figura 2b è possibile individuare i materiali più efficienti del cartone, sia dal punto di vista del costo, che dell'impatto ambientale dovuto al loro contenuto energetico. Come è possibile notare, il legno è l'unico materiale che può consentire un migliore comportamento sia rispetto alle due metriche funzionali (peso e volume), che a quelle economica e ambientale. L'alluminio

logie principali di effetti sull'ambiente [Guinée et al., 1993]: impoverimento delle risorse, fenomeni di emissione e inquinamento, fenomeni di cambiamento delle strutture ambientali (degradazione del suolo, delle acque, dell'aria). A questo scopo è necessario ricorrere a tecniche specifiche come l'analisi del ciclo di vita (Life cycle assessment - Lca), che consiste in un procedimento oggettivo di valutazione del consumo di risorse e dell'emissione di rifiuti relativi a una generica attività industriale, ovvero all'intero ciclo di vita del prodotto di tale attività, mediante la determinazione quantitativa di tutti i flussi di scambio tra il sistema prodotto-ciclo di vita e l'ecosfera, che competono a tutti i processi di trasformazione coinvolti, dall'estrazione delle materie prime fino al loro ritorno nell'ecosfera sotto forma di rifiuti. Basata su procedure ormai standardizzate [Iso 14040 2006], la Lca si avvale di strumenti che nelle forme più evolute consentono di elaborare i dati quantitativi in gioco e fornire degli indicatori univoci di impatto, come ad esempio gli ecoindicatori ottenuti mediante il metodo Eco-indicator 99 [Goedkoop e Spriensma, 2000]. In questo modo è possibile: associare a materiali e processi impatti ambientali quantificati mediante indicatori numerici unitari (rispettivamente per unità di peso o volume, e per unità di quantità processate o di parametri di processo significativi); quantificare l'impatto ambientale delle varie fasi del ciclo di vita, in funzione dei principali parametri di progetto, e delle caratteristiche dei processi previsti per le diverse fasi del ciclo di vita. Mediante questo approccio completo al ciclo di vita e al suo impatto ambientale, è possibile stimare in sede di progetto le conseguenze che le scelte principali hanno sull'impatto ambientale che l'imballaggio avrà nelle fasi principali della sua vita, consentendo in definitiva di progettare il ciclo di vita con l'obiettivo di ridurre l'impatto complessivo. In termini ge-



3. Modelli del ciclo di vita e analisi degli impatti ambientali.

nerali, quest'ultimo può essere espresso nella forma seguente:

$$EI_{LC} = EI_{PROD} + (EI_{USE}) + EI_{REUSE} + EI_{REC} + EI_{DISP} \quad (6)$$

dove

$EI_{PROD} = ei_{mat} \cdot Q + ei_{prss} \cdot Q'$ - Impatto ambientale di produzione, con ei_{mat} ecoindicatore del materiale, ei_{prss} ecoindicatore del processo primario, Q quantità del materiale, Q' parametro quantitativo da cui dipende l'impatto del processo primario. EI_{PROD} dipende quindi dai materiali, dalle quantità in gioco, e dai processi di fabbricazione.

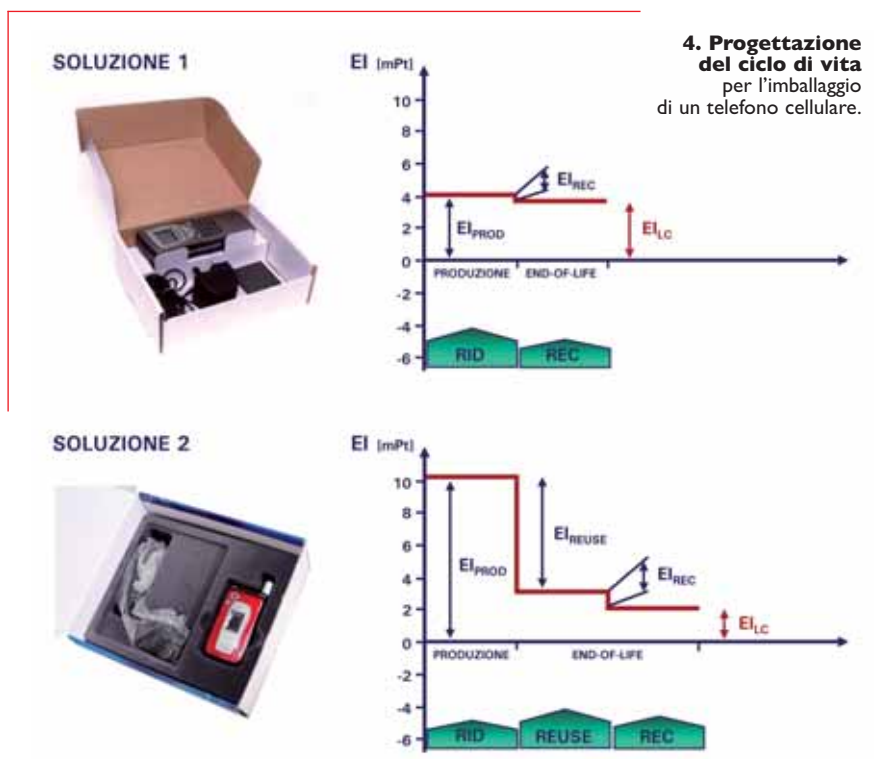
EI_{USE} - Impatto ambientale di utilizzo. Esso

non sempre è definibile, e per questo motivo a volte viene trascurato. In termini generali può essere ricondotto all'impatto ambientale associato al consumo di carburante per il trasporto, legato al peso dell'imballaggio stesso per unità funzionale (volume contenuto).

$EI_{REUSE} = \sum_{r=1}^r v \cdot (-EI_{PROD})$ - Impatto ambientale di riutilizzo. Esso è un recupero di impatto, dovuto al fatto che riutilizzando l'imballaggio si recupera l'impatto EI_{PROD} associato alla produzione di un imballaggio uguale che lo dovrebbe sostituire, se non fosse riutilizzato. Il coefficiente di perdita v tiene conto del fatto che l'impatto recuperato deve essere stimato al netto dell'impatto associabile al processo di riutilizzo (raccolta, eventuale ricondizionamento). EI_{REUSE} dipende quindi dai materiali, dalle quantità in gioco, e dai processi di fabbricazione (così come EI_{PROD}), e inoltre dalla stabilità prestazionale dell'imballaggio (durata), che determina la possibilità di riutilizzarlo una o più volte (r è il numero di possibili riutilizzi), e dall'efficienza della logistica inversa, che gestisce i processi a fine utilizzo.

$EI_{REC} = -ei_{ric} \cdot \xi Q + ei_{inc} \cdot (1-\xi)\eta Q$ - Impatto ambientale di recupero. Il primo termine quantifica l'impatto di riciclo della frazione ξQ (ξ è la frazione riciclabile), e generalmente è un recupero di impatto (l'ecoindicatore di riciclo del materiale ei_{ric} è negativo, a conferma della convenienza ambientale del riciclo). Il secondo termine quantifica l'impatto di recupero della frazione $(1-\xi)\eta Q$ (η è la frazione processabile mediante incenerimento, con conseguente recupero energetico), e generalmente è anch'esso un recupero di impatto (l'ecoindicatore di incenerimento del materiale ei_{inc} è anch'esso negativo, per il beneficio ambientale del recupero energetico). EI_{REC} dipende quindi dai materiali (riciclabilità e attitudine al recupero energetico) e dalle quantità in gioco, oltre che dall'efficienza dei processi di recupero e della logistica inversa.

$EI_{DISP} = -ei_{dis} \cdot (1-\xi)(1-\eta)Q$ - Impatto ambientale di dismissione. Quantifica l'impatto di messa in discarica della frazione $(1-\xi)(1-\eta)Q$ che



non può essere né riciclata né processata per recupero energetico. EI_{DISP} dipende anch'essa dai materiali (impatto di messa in discarica $e_{i_{disp}}$, riciclabilità e attitudine al recupero energetico) e dalle quantità in gioco.

Analisi e conseguenze

Mediante questo tipo di modellazione dell'impatto nell'intero ciclo di vita, il progettista è in grado di stimare le conseguenze ambientali delle scelte di progetto. A seconda di queste ultime, il ciclo di vita dell'imballaggio può svilupparsi secondo i modelli descritti dai grafici in figura 3, che rappresentano la composizione dell'impatto ambientale del ciclo di vita.

Il modello I rappresenta la condizione di assenza di riutilizzo e recupero ($r=0$, $\xi=0$, $\eta=0$). In questo caso è possibile intervenire mediante la sola strategia di riduzione quantitativa, per contenere il valore finale di EI_{LC} . Il modello II prevede il riciclo dei materiali ($\xi>0$), ed eventualmente il recupero energetico ($\eta>0$). In questo modo, oltre ad avere un recupero di impatto, si ha una contrazione dell'impatto di dismissione, dovuta alla riduzione dei volumi da porre in discarica. Il modello III descrive il caso in cui la progettazione dell'imballaggio consenta anche un suo riutilizzo ($r=1$), con conseguente recu-

pero di parte dell'impatto di produzione, il cui beneficio ambientale può essere più o meno incisivo a seconda della durata e stabilità funzionale dell'imballaggio e dell'efficienza del processo di riutilizzo. Nella condizione ottimale in cui il riutilizzo è talmente efficiente da consentire un sostanziale recupero dell'impatto di produzione ($v \rightarrow 1$), è possibile che si determini un complessivo beneficio ambientale del ciclo di vita ($EI_{LC} < 0$). Il modello IV infine rappresenta il caso in cui siano possibili più riutilizzi ($r > 1$), che consentirebbero un recupero di impatto tale da avere un più netto beneficio ambientale del ciclo di vita.

Una modellazione del genere può supportare le scelte di progetto, mediante l'auspicato approccio completo al ciclo di vita, e tenendo conto di indicatori di impatto complessivo. Utilizzandola per esempio nel caso della progettazione di un imballaggio per telefoni cellulari (figura 4), è possibile confrontare due soluzioni alternative: la prima prevede involucro esterno e supporto interno in cartone, entrambi riciclabili; la seconda prevede un supporto interno in plastica (PS), potenzialmente riutilizzabile, oltre che riciclabile. In entrambi i casi è stata ipotizzata la condizione ideale di riciclo integrale ($\xi=1$).

Confrontando il bilancio di impatto del ciclo di vita (valutato mediante il già citato metodo Eco-indicator 99, che permette di stimare gli ecoindicatori in mPt, unità di misura fittizia), benché la seconda soluzione comporti un impatto di produzione più che doppio rispetto alla prima, e sia quindi meno efficiente dal punto di vista della strategia di riduzione, in relazione all'intero ciclo di vita può risultare ambientalmente più sostenibile proprio in virtù del riutilizzo del supporto (il cui beneficio ambientale è stato stimato per $v=0,7$). Essa è quindi la soluzione che si attesta come più interessante tra le due, anche perché di maggiore qualità e miglior presa sul consumatore. Questi ultimi aspetti la rendono particolarmente adatta a prodotti di fascia di mercato più alta, che possono sorreggere un eventuale incremento del costo dell'imballaggio.

F. Giudice, G. La Rosa, A. Risitano – Dipartimento di ingegneria industriale e meccanica dell'Università di Catania.

readerservice.it n. 70

Bibliografia

Ashby M.F. (2005), *Materials Selection in Mechanical Design* (3rd ed). Elsevier, Oxford.

Giudice F., La Rosa G., Risitano A. (2005), "Materials selection in the life-cycle designprocess: A method to integrate mechanical and environmental performances in optimal choice". *Materials & Design*, Vol. 26, pp. 9-20.

Goedkoop M., Spriensma R. (2000), *The Eco-indicator 99: Methodology report*. Pré Consultants BV, Amersfoort, The Netherlands.

Guinée J.B., Udo de Haes H.A., Huppes G. (1993), "Quantitative life cycle assessment of products: Goal definition and inventory". *Journal of Cleaner Production*, Vol. 1, pp. 3-13.

Hekkert M.P., Joosten A.J., Worrell E., Turkenburg W.C. (2000), "Reduction of CO₂ emissions by improved management of material and product use: The case of primary packaging". *Resources Conservation & Recycling*, Vol. 29, pp. 33-64.

Iso 14040 (2006) *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.