

Capitolo 3

Proprietà fisiche dei materiali di packaging (I): proprietà di superficie, termiche, meccaniche ed elettromagnetiche

Le proprietà fisiche dei materiali di packaging sono in relazione a fenomeni che non comportano variazioni della struttura chimica e che sono spesso di natura reversibile. Alle proprietà fisiche, che sono numerosissime, sono sempre associate grandezze fisiche ben definite e convenientemente misurabili in modo oggettivo e strumentale. Per qualsiasi materiale, in particolare per i solidi, è comune classificare le proprietà fisiche in cinque categorie: *proprietà di superficie, termiche, meccaniche, elettromagnetiche* (trattate in questo capitolo) e *diffusionali* (trattate nel capitolo 4). Questa classificazione verrà seguita per presentare e discutere le proprietà fisiche dei materiali di imballaggio che è opportuno conoscere per selezionare il packaging adeguato (in relazione alle esigenze di protezione e di conservazione dell'alimento), per ottimizzarne l'impiego o per verificare i contenuti di un capitolato di fornitura o di una specifica tecnica.

3.1 Proprietà di superficie

3.1.1 Tensione superficiale, bagnabilità e adesività

La conoscenza delle proprietà di superficie di un materiale è fondamentale per il successo di operazioni tecnologiche importanti quali l'adesione e la stampa, per l'ottimizzazione di caratteristiche funzionali come la repellenza all'acqua e agli oli, la brillantezza e, ancora, per valutare le proprietà delle superfici, prima e dopo specifici trattamenti volti a migliorarne le prestazioni. Le proprietà di superficie si riferiscono alle proprietà all'interfaccia tra due materiali diversi (nel caso per esempio dell'adesione tra strati differenti di un materiale composito) o tra un materiale e una fase a contatto (nel caso, per esempio, della deposizione di un inchiostro di stampa).

Alla base di molte proprietà di superficie dei materiali di confezionamento vi è la cosiddetta tensione superficiale, o energia libera superficiale, che si manifesta a livello della superficie di separazione (interfaccia) tra un fluido (con il termine fluido si intende genericamente qualsiasi sostanza liquida o aeriforme) e un mezzo di natura differente allo stato solido, liquido o gassoso.

All'origine della tensione superficiale vi è la forza di coesione tra le molecole costituenti il mezzo. Le molecole presenti all'interno del suo volume sono infatti circondate in ogni direzione da altre molecole simili; pertanto, la risultante media delle forze agenti su una singola molecola è nulla. La situazione per le molecole in superficie è differente, non essendo

circondate in ogni direzione da altre molecole simili; la conseguenza di queste forze intermolecolari non condivise è una maggiore forza di coesione verso le molecole vicine. Questo aumento di forza dei legami intermolecolari fa sì che la superficie del mezzo possieda un'energia libera maggiore rispetto a quella presente all'interno, energia che prende il nome di tensione superficiale (γ). L'energia libera superficiale si traduce in un lavoro di deformazione della superficie, facilmente osservabile in un liquido che forma un menisco. Il lavoro necessario per incrementare l'area della superficie libera del mezzo, vale a dire il numero di molecole superficiali, sarà pari a:

$$W = \gamma \Delta A \quad (3.1)$$

dove:

W = lavoro di deformazione della superficie (N m, J)

γ = tensione superficiale (N m^{-1})

ΔA = variazione di superficie (m^2)

di conseguenza:

$$\gamma = \frac{W}{\Delta A} \quad (3.2)$$

La tensione superficiale avrà pertanto dimensioni $\text{J m}^{-2} = \text{N m m}^{-2} = \text{N m}^{-1}$. La tensione superficiale dipende anche dalla temperatura che, per effetto del moto di agitazione termica delle molecole, ne diminuisce le forze di coesione: nei liquidi più caldi, infatti, la tensione superficiale risulta inferiore.

Osservare un lavoro di deformazione della superficie in un solido, per effetto della tensione superficiale, è possibile solo a temperature prossime a quella di fusione a causa della mancanza di mobilità delle sue molecole a temperature inferiori; pertanto per i solidi si è soliti esprimere un valore di tensione superficiale critica (γ_c) che rappresenta la loro tendenza a essere bagnati da un determinato liquido e in tabella 3.1 sono riportati i valori di tensione superficiale di alcuni materiali di confezionamento rispetto all'acqua e di alcuni liquidi in aria espressi in milli Newton su metro (mN m^{-1}).

Come si è già detto introducendo il concetto di tensione superficiale, il fenomeno può sempre essere definito in relazione alla superficie di separazione tra due fasi e in molti casi di interesse pratico non è sufficiente considerare le sole forze di coesione del mezzo, in

Tabella 3.1 Valori indicativi di tensione superficiale (a temperatura ambiente) di fluidi e materiali per l'imballaggio

Materiale	Tensione superficiale
Politetrafluoroetilene	18,5
Polietilene	31
Polivinilcloruro	39
Polietilentereftalato	43
Cellophane (cellulosa rigenerata)	44
Poliammide 6.6 (Nylon)	46
Vetro pirex	170
Acqua	73
Inchiostri da stampa a base solvente	34-38

quanto la presenza delle molecole di un'altra fase influenza (attraverso forze di *adesione*) le proprietà di superficie. Quando un liquido e un solido vengono in contatto, per esempio, a causa delle interazioni tra le differenti fasi viene a stabilirsi una "tensione interfacciale" definita come l'energia addizionale per unità di area dovuta alla formazione di un'interfaccia solido/liquido.

Nelle applicazioni di packaging, superfici di separazione tra due fasi sono comuni e possono essere rappresentate, per esempio, da quelle tra un materiale e un rivestimento, un inchiostro o un adesivo su di esso depositati.

La tensione superficiale determina molte fondamentali proprietà, come la capillarità, la formazione di gocce, la bagnabilità e l'adesività. Queste ultime meritano un approfondimento, poiché svolgono un ruolo essenziale nella definizione di importanti caratteristiche funzionali dei materiali e nelle loro tecniche di trasformazione.

La *bagnabilità* è quella situazione in cui una superficie liquida e una solida entrano in contatto tra di loro, stabilendo una situazione di equilibrio nella quale la risultante delle interazioni molecolari tra le varie interfacce coinvolte è tale da garantire la stabilità della struttura. Il grado di bagnabilità, dunque, dipende dalla tensione superficiale del liquido e dalle energie interfacciali. Una fase liquida bagna completamente una superficie solida solo se la sua tensione superficiale è inferiore alla tensione superficiale critica (γ_c) del solido. La conoscenza della bagnabilità di un materiale consente, per esempio, di definire il grado di idrorepellenza e oleorepellenza delle superfici, caratteristiche molto importanti ai fini della resistenza, rispettivamente all'acqua e all'olio, dei materiali di confezionamento. Queste caratteristiche sono molto richieste, per esempio, ai materiali cellulose (carte, cartoncini, cartoni) destinati all'avvolgimento o al contenimento di prodotti alimentari umidi o grassi. La conoscenza di tale grandezza, inoltre, consente di scegliere in modo adeguato gli inchiostri da stampa da utilizzare sui differenti substrati.

Le materie plastiche hanno prevalentemente tensioni superficiali abbastanza basse, in alcuni casi anche inferiori a 28 mN m^{-1} . Per esempio, i film poliolefinici a base di PP o PE hanno superfici poco bagnabili e non adatte all'applicazione di sostanze come inchiostri, adesivi o rivestimenti acquosi, poiché sono prive di gruppi funzionali polari che potrebbero alzare la loro energia superficiale. La scelta degli inchiostri da stampa deve pertanto tenere in considerazione questo aspetto: affinché l'inchiostro possa spandersi sul materiale e, quindi, interagire con esso, deve avere tensione superficiale inferiore di almeno 10 mN m^{-1} rispetto al supporto, oppure occorre aumentare la tensione superficiale del materiale con opportuni trattamenti (a corona, a fiamma, al plasma eccetera, come descritto nel capitolo 10). La scarsa bagnabilità dei materiali plastici nei confronti dell'acqua è anche la causa della formazione di goccioline d'acqua sulla superficie interna delle confezioni contenenti prodotti alimentari a elevata umidità. In seguito a variazioni di temperatura, infatti, l'umidità evapora e condensa sulla superficie del film, che – avendo una tensione superficiale critica inferiore a quella dell'acqua – ne impedisce la distensione.

L'*adesività* rappresenta la forza di legame tra due superfici o, più frequentemente, tra una superficie e un adesivo o un rivestimento (*coating*). Anche in questo caso, per ottenere buone adesività tra un qualsiasi substrato e un adesivo o un coating, la tensione superficiale di questi ultimi deve essere inferiore alla tensione superficiale critica del substrato per garantire una piena interazione tra le due fasi. Ovviamente, in questo caso, anche bassi valori di viscosità della sostanza che deve essere depositata sulla superficie sono indispensabili per una migliore dispersione e una migliore bagnabilità del substrato e, comunque, deve essere possibile l'instaurarsi di legami secondari tra le molecole dei due materiali per garantire l'ottimale adesione tra i due mezzi.

3.1.2 Metodi di misura delle proprietà di superficie

La tensione superficiale e, più in generale, le proprietà di superficie possono essere misurate in diversi modi e con differenti strumenti, a seconda che si vogliano caratterizzare solidi o liquidi. Per quanto concerne i dispositivi impiegati, una distinzione generale può essere fatta tra i tensiometri e i sistemi di misura dell'angolo di contatto.

I primi valutano l'intensità della forza necessaria per rompere la superficie di un liquido quando si solleva un filo o un anello sottile appoggiato su di essa. I secondi si basano sulla valutazione dell'angolo formato da una goccia di liquido a contatto con una fase solida o gassosa. I metodi di misura possono essere distinti a seconda che si basino su sistemi ottici, sull'uso di strumenti (piatti, anelli, fili ecc.) oppure sulla pressione. La tabella 3.2 presenta una sintetica descrizione dei principali metodi di misura della tensione superficiale e di altre proprietà di superficie. Per approfondimenti sui singoli metodi, si rimanda ai numerosi testi specializzati.

Tabella 3.2 Principali metodi per la misurazione delle proprietà di superficie

Metodo	Descrizione	Parametri e range di tensione ($mN\ m^{-1}$)
<i>Metodi di misura per liquidi</i>		
Metodo dell'anello di Du Noüy	Consiste nel misurare la forza richiesta per sollevare dall'interfaccia liquida un anello metallico utilizzando una bilancia a torsione. Viene misurata la spinta massima esercitata dal fluido sull'anello	Tensione superficiale o interfacciale statica in funzione di tempo e temperatura Range: 1-1000
Metodo del piatto di Wilhelmy	Metodo universale adatto soprattutto quando si debba misurare la tensione superficiale a intervalli di tempo molto lunghi. Il piatto ha caratteristiche geometriche note e, anche in questo caso, viene misurata la spinta esercitata dal fluido sul piatto. È simile al metodo di Du Noüy	Tensione superficiale o interfacciale statica in funzione di tempo e temperatura Range: 1-1000
Metodo della goccia rotante	È ideale per determinare bassissime tensioni interfacciali. Viene misurato il diametro di una goccia collocata in un fluido più denso, mentre entrambi i liquidi vengono fatti ruotare. Il liquido a densità più elevata viene spinto verso le pareti del tubo dalla forza centrifuga	Tensione superficiale o interfacciale statica in funzione di tempo e temperatura Solubilità e comportamento diffusivo delle fasi liquide a contatto Proprietà di rilassamento all'interfaccia Range: 10^{-5} -20
Metodo della goccia pendente	È utile per definire le tensioni superficiali e interfacciali dei fluidi, anche a temperature e pressioni elevate. Misura la dimensione di una goccia sospesa della fase più pesante (o di una bolla della fase più leggera) formata nella sua fase di equilibrio	Tensione superficiale o interfacciale statica in funzione di tempo e temperatura Coefficienti di adsorbimento/diffusione di molecole surfattanti Range: 0,05-1000

continua

Tabella 3.2 segue

Metodo	Descrizione	Parametri e range di tensione ($mN m^{-1}$)
<i>Metodi di misura dinamici per liquidi</i>		
Metodo della pressione di bolla	Determina la tensione superficiale in funzione del tempo di vita di una bolla di gas immersa nel liquido in esame. Viene misurata la pressione massima di ciascuna bolla	Tensione superficiale dinamica in funzione del tempo di vita di una bolla o della sua frequenza di formazione Tensione superficiale dinamica in funzione della temperatura Range: 10-100
Metodo del volume di goccia	Determina la tensione interfacciale in funzione del tempo necessario per produrre le gocce quando un liquido, con una certa densità, viene pompato all'interno di un secondo liquido con differente densità	Tensione superficiale dinamica in funzione del tempo di vita di una bolla o della velocità di dosaggio Tensione interfacciale in funzione della temperatura o della concentrazione Range: 0,1-100
<i>Metodi di misura per solidi</i>		
Metodo della goccia sessile (statico)	Viene utilizzato per determinare le caratteristiche di bagnabilità di una parte localizzata della superficie di un solido. Si misura l'angolo formato dalla base della goccia e dalla tangente al contorno della goccia stessa	Angolo di contatto statico di una goccia sessile deposta su una superficie in funzione del tempo e della temperatura Angolo di contatto dinamico in funzione dell'angolo di avanzamento, di recessione e dell'angolo di dosaggio Isteresi dell'angolo di contatto per aggiunta e rimozione del liquido Tensione superficiale critica ed energia libera Range: 0,1-1000
Metodo dinamico di Wilhelmy	Calcola la media tra avanzamento e ritorno dell'angolo di contatto su solidi con geometria uniforme. Entrambi i lati del solido devono avere le stesse caratteristiche. La bagnabilità del solido viene misurata immergendolo e ritirandolo in un liquido a tensione superficiale nota	Angolo di contatto dinamico in funzione della velocità di immersione del campione, dell'angolo di avanzamento e di recessione Isteresi dell'angolo di contatto Tensione superficiale critica ed energia libera Range: 0,1-1000

3.1.2.1 Metodo della goccia sessile

Tra le metodiche di misura delle proprietà superficiali, il metodo della goccia sessile (in condizioni statiche e dinamiche) è quello che si presta maggiormente alla descrizione delle proprietà di superficie dei materiali di confezionamento. Il metodo, realizzato attraverso strumentazione computerizzata dotata di telecamere e dosatori automatici, consiste nel misurare l'angolo di contatto, ossia l'angolo che la tangente alla goccia di liquido forma con la superficie di contatto solido-liquido nel punto P di contatto delle tre fasi (solido, liquido, vapore), (figura 3.1). L'angolo di contatto corrisponde alla grandezza termodinamica che minimizza l'energia libera superficiale del sistema ed è fisicamente descritto dalla legge di Young (eq. 3.3), che corrisponde al bilancio delle forze orizzontali agenti su una goccia di volume trascurabile deposta su una superficie ideale:

$$\gamma_{AS} = \gamma_{LS} + \gamma_{AL} \cos \theta = 0 \quad (3.3)$$

dove γ_{AS} è la tensione interfacciale solido-aria, γ_{LS} è la tensione interfacciale solido-liquido e γ_{AL} la tensione superficiale aria-liquido. Ciò significa che quando una goccia di liquido è posta su una superficie solida il suo perimetro si allarga o si contrae, fino a quando l'angolo θ assume il valore fornito dall'equazione:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{AS} - \gamma_{LS}}{\gamma_{AL}} \quad (3.4)$$

L'angolo di contatto definito dall'equazione di Young è l'angolo di equilibrio termodinamico; esso è talvolta chiamato angolo di contatto di Young o angolo di contatto statico (θ_Y). In questa situazione, il liquido forma una goccia simmetrica sulla superficie del solido, con un angolo di contatto costante in ogni punto di intersezione tra le tre fasi.

Se si conviene di correlare la bagnabilità con la misura dell'angolo θ , si possono presentare quattro possibili casi.

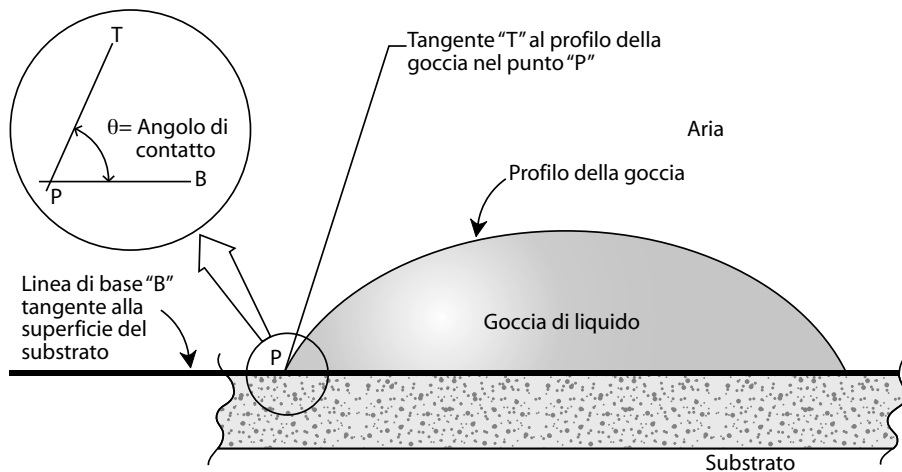


Figura 3.1 Goccia di liquido depositata su una superficie solida.

- La bagnabilità è massima (e quindi il liquido si spande perfettamente sul solido) quando l'angolo θ è pari a 0 ($\cos\theta = 1$). Essa è dovuta a una bassa tensione superficiale del liquido, a una bassa tensione interfacciale e a una grande tensione superficiale del solido. In altre parole, è quello che accade quando i liquidi sono maggiormente attratti dalla superficie del solido piuttosto che dalla forza di coesione molecolare (per esempio, l'olio depositato su un vetro).
- La bagnabilità della superficie è parziale quando l'angolo θ è inferiore a 90° ($0 < \cos\theta < 1$). Questa situazione si presenta quando $\gamma_{AS} > \gamma_{LS}$ ed è particolarmente evidente quando la tensione superficiale del liquido è elevata.
- La bagnabilità della superficie è scarsa quando $\theta > 90^\circ$ ($0 < \cos\theta < -1$); si verifica se $\gamma_{AS} < \gamma_{LS}$.
- Non si ha bagnabilità quando $\theta = 180^\circ$ ($\cos\theta = -1$). In questo caso la forza di coesione del liquido è più grande della forza di adesione e il liquido respinge il solido. Si dice, dunque, che il solido è idrofobico e la goccia tende ad assumere una forma sferica.

Per quanto concerne l'adesività, non sempre a una buona bagnabilità corrisponde una buona adesività. In altre parole, per gli adesivi la proprietà di bagnabilità è una condizione necessaria ma non sufficiente; infatti, come si è visto, l'adesività dipende anche da fattori differenti dalla tensione superficiale. Per esempio, due polimeri, con stessa energia superficiale e uguale angolo di contatto, possono avere struttura chimica superficiale molto diversa e comportarsi, quindi, diversamente a seconda del tipo di prodotto (colla, vernice, inchiostro ecc.) al quale devono aderire. È dunque necessario studiare attentamente, per una data combinazione materiale/prodotto di adesione quali sono i fattori di interazione che maggiormente influenzano il risultato finale.

In molte situazioni reali (per esempio in presenza di superfici ruvide) l'angolo di contatto θ sperimentalmente osservato differisce da quello statico, cioè non risponde all'equazione di Young. In tali circostanze è di estrema utilità valutare l'angolo di contatto dinamico, considerando una goccia di liquido in moto sulla superficie di un solido. In questo caso, l'angolo di contatto varia a seconda del punto di intersezione tra le fasi considerato rispetto alla direzione del moto; in particolare, è possibile individuare un angolo di contatto d'avanzamento (θ_A) di valore maggiore rispetto all'angolo di arretramento (θ_R) (figura 3.2). La differenza tra questi due angoli ($\theta_A - \theta_R$) è definita isteresi dell'angolo di contatto.

La determinazione dell'isteresi dell'angolo di contatto è utile per evidenziare le eterogeneità presenti sulla superficie di un materiale e, quindi, per comprendere la relazione tra morfologia e proprietà di superficie. Per una superficie solida ideale, morfologicamente e chimicamente

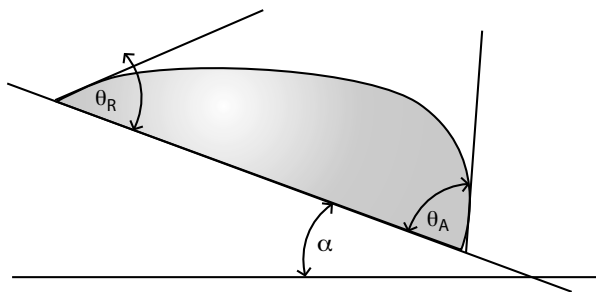


Figura 3.2 Angolo di contatto dinamico: goccia di liquido in moto su una superficie in pendenza.

te omogenea, l'isteresi dell'angolo di contatto è pari a zero e il valore di θ sperimentalmente osservato in condizioni dinamiche è uguale a quello misurato in condizioni statiche (θ_Y).

Per una superficie liscia, ma chimicamente eterogenea, il valore di θ sperimentalmente osservato non è più uguale a θ_Y . In questo caso, tuttavia, il valore di θ_a sperimentalmente osservato può essere considerato una buona approssimazione di θ_Y .

Per una superficie ruvida, invece, l'angolo di contatto osservato aumenta all'aumentare della ruvidità rispetto a una superficie liscia ma con la stessa chimica di superficie. In altre parole, i valori di θ sono maggiori di quelli misurati su superfici chimicamente equivalenti ma lisce; essi non riflettono dunque le proprietà chimiche della superficie, ma solo le sue proprietà morfologiche.

3.1.3 Relazione tra angolo di contatto ed energia superficiale

Come mostrato in tabella 3.2, esistono differenti tecniche per misurare l'angolo di contatto (metodi tensiometrici, goniometrici ecc.), per la cui descrizione si rinvia ai testi specializzati. È però importante sapere che l'angolo di contatto e la tensione superficiale del liquido sono gli unici parametri dell'equazione di Young direttamente misurabili.

La tensione all'interfaccia tra il solido e il liquido, invece, non può essere stimata attraverso misure oggettive. Questo significa che rimangono due incognite (la tensione solido-liquido e la tensione solido-aria) che non possono essere determinate con una sola equazione. Pertanto, la caratterizzazione di una superficie in termini di tensione superficiale critica o di energia libera può essere condotta solo indirettamente, valutando l'angolo di contatto che diverse soluzioni liquide e con tensione superficiale nota formano su di una superficie. Dalle misure relative al coseno dell'angolo di contatto all'interfaccia solido-liquido-aria del liquido puro sulla superficie da testare si può risalire al valore di tensione superficiale critica riportando in un grafico (grafico di Zisman, figura 3.3) il coseno dell'angolo in funzione della tensione superficiale di ciascun liquido. L'extrapolazione della retta che si ottiene fino a

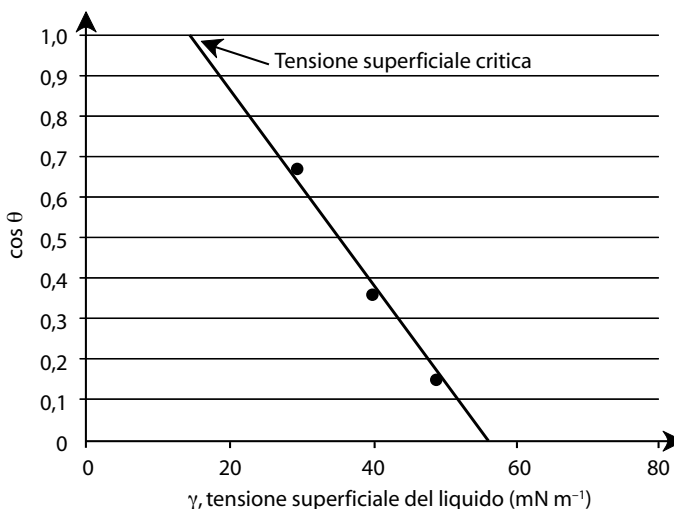


Figura 3.3 Esempio di applicazione del grafico di Zisman per stimare la tensione superficiale critica.

incontrare il valore per cui l'angolo di contatto è zero (quindi il coseno è pari a 1) consente di stimare la tensione superficiale critica.

3.1.4 Modificazione dell'energia superficiale

L'energia superficiale dei materiali e dei contenitori di imballaggio può essere modificata attraverso differenti approcci.

3.1.4.1 Trattamenti superficiali

La modificazione della superficie corrisponde a un'azione chimica o fisica (acidi/ossidanti; trattamenti a fiamma, a corona, UV, al plasma ecc.) realizzata sulla superficie del materiale, che risulta per questo alterata senza tuttavia perdere le proprietà fondamentali. Un esempio è il trattamento al plasma di materiali cartacei destinati al contatto con alimenti umidi. La superficie dei materiali cartacei ha infatti un'energia elevata rispetto ai liquidi polari, come l'acqua. L'idrofilicità dei materiali cartacei è determinata dai numerosi gruppi idrossile presenti sulla superficie della cellulosa che interagiscono con l'acqua creando legami idrogeno. Un metodo per aumentare l'idrorepellenza dei materiali cartacei – e poterli, quindi, utilizzare a contatto con alimenti umidi – è rendere le superfici altamente apolari.

Utilizzando la tecnologia al plasma (vedi par. 10.1.1) è possibile deporre su superfici cartacee film di circa 200-300 nm di polisilossani, polimeri inorganici il cui scheletro è costituito da una catena di atomi di silicio; la presenza nei polisilossani di numerosi gruppi metilici rende le superfici sulle quali sono stati depositi altamente apolari e quindi idrorepellenti.

3.1.4.2 Utilizzo di additivi

In questo caso una nuova specie chimica viene aggiunta al materiale affinché sia disponibile all'interfaccia e ne riduca la tensione superficiale. Ne sono esempio gli additivi antistatici e quelli antifog, ossia anti-condensa. Questi ultimi vengono aggiunti alla matrice polimerica in fase di lavorazione; hanno una natura chimica generalmente incompatibile con quella del polimero con il quale sono miscelati e, come risultato, tendono a portarsi spontaneamente sulla superficie del materiale. Questi additivi sono attivatori di superficie in grado di ridurre la tensione superficiale delle gocce d'acqua che potrebbero formarsi all'interno di una confezione in seguito a fenomeni di condensazione. In questo modo, l'angolo di contatto delle gocce d'acqua si riduce drasticamente e viene favorita la loro dispersione sulla superficie del materiale. Questo effetto aiuta a mantenere il giusto grado di trasparenza del materiale di confezionamento, esaltandone le caratteristiche estetiche e, entro certi limiti, impedendo alla condensa di contribuire al peggioramento delle caratteristiche qualitative del prodotto.

3.1.4.3 Realizzazione di rivestimenti o di coating

Nell'operazione di rivestimento una nuova specie chimica ricopre la superficie del materiale, esponendo all'interfaccia un materiale con natura chimica diversa. È il caso, per esempio, della spalmatura di un *primer* (promotore di adesione) per favorire il processo di laminazione di materiali diversi per la realizzazione di strutture multistrato. L'incompatibilità tra le superfici dei diversi strati rende necessaria la deposizione alla loro interfaccia di un'apposita sostanza che modifichi le energie superficiali e permetta la deposizione ottimale dell'adesivo. In questo modo i due materiali aderiranno perfettamente.

3.2 Proprietà termiche

In termini generali le proprietà termiche di un materiale sono quelle che descrivono il suo comportamento in risposta alle sollecitazioni termiche, nel corso di un processo di scambio termico o in conseguenza di una variazione di temperatura (riscaldamento, raffreddamento). Trasferimenti di calore possono riguardare gli imballaggi alimentari durante le operazioni di risanamento termico (pastorizzazione o sterilizzazione post-confezionamento) oppure durante la produzione, il riempimento o la chiusura (saldatura) del contenitore; le variazioni di temperatura, in genere, riguardano le condizioni di stoccaggio o di distribuzione. Le principali proprietà termiche che interessano il settore dei materiali di confezionamento sono la *conducibilità termica*, la *capacità termica*, i *coefficienti di dilatazione termica*, gli *intervalli utili di temperatura*, le *temperature di transizione* e il *potere calorifico*.

3.2.1 Conducibilità termica

L'attitudine di una determinata sostanza (non solo solida, ma anche liquida o gassosa) a trasmettere calore per conduzione viene definita conducibilità termica e corrisponde alla quantità di calore trasferito perpendicolarmente a una superficie di area unitaria, a causa di un gradiente di temperatura, nell'unità di tempo e in condizioni stabili. Tale trasferimento è dovuto esclusivamente al gradiente di temperatura.

Considerando un tratto infinitesimo di un materiale, la conducibilità termica può essere espressa dalla legge di Fourier, che regola i fenomeni stazionari (ossia costanti nel tempo) di conduzione del calore:

$$\varphi = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad (3.5)$$

dove:

φ = flusso di calore, ossia la quantità di calore nell'unità di tempo (W);

A = area superficiale interessata dal flusso di calore (m²);

λ = conducibilità termica, ossia il coefficiente di proporzionalità tra flusso termico e gradiente di temperatura (W m⁻¹ °C⁻¹);

dT/dx = gradiente di temperatura (°C m⁻¹).

Unità di misura equivalenti sono: kcal m⁻¹ h⁻¹ °C⁻¹; J m⁻¹ s⁻¹ °C⁻¹ (1 kcal m⁻¹ h⁻¹ °C⁻¹ corrisponde a 1,163 W m⁻¹ °C⁻¹). La conducibilità termica dipende dalle caratteristiche fisico-chimiche del materiale e consente di classificare i materiali in isolanti e conduttori termici, a seconda che il suo valore sia più o meno elevato. Quanto più basso è il valore di conducibilità termica, tanto migliore è il potere isolante del materiale stesso, ovvero il materiale con più basso valore di conducibilità possiede la più elevata resistenza alla trasmissione di energia. In generale i materiali isolanti hanno un valore di λ inferiore a 1 W m⁻¹ °C⁻¹.

Come appare evidente dalla tabella 3.3, almeno un ordine di grandezza separa i materiali metallici da tutti gli altri e quelli organici mostrano i valori più bassi in assoluto; a parità di spessore, quindi, un trasferimento di calore sarà più veloce quando interesserà una superficie di metallo rispetto a una di vetro o di plastica. Anche considerando solo le materie plastiche, tuttavia, si osservano differenze significative, che possono giustificare differenti utilizzi dei diversi polimeri. I valori di conducibilità termica sono sicuramente influenzati da molteplici fattori, tra i quali la composizione chimica del materiale, la densità del materiale e la struttura molecolare del materiale.

Tabella 3.3 Conducibilità termica a temperatura ambiente di alcuni materiali utilizzati per la fabbricazione di imballaggi (valori indicativi)

Materiale	Conducibilità termica ($W m^{-1} °C^{-1}$)
Alluminio	210-236
Acciaio inox	15-50
Vetro	1,0-1,3
Polietilene a bassa densità	0,48-0,50
Polivinilcloruro	0,16-0,19
Carta e Cartone	0,12-0,25
Legno	0,11-0,21
Polipropilene	0,10-0,22
Cartone ondulato	0,060-0,064
Sughero	0,033-0,048
Polistirene espanso	0,03-0,05

Considerato che a 20 °C l'aria ha una conducibilità termica di 0,02 W m⁻¹ °C⁻¹, si comprende perché materiali espansi come il polietilene o il polistirene o, ancora, come il cartoncino ondulato, abbiano a parità di spessore caratteristiche isolanti. Si tratta, infatti, di strutture che contengono spazi vuoti, e quindi aria che riduce la conducibilità termica degli stessi materiali.

3.2.2 Capacità termica e calore specifico

La capacità termica (C) è la quantità di calore da fornire a un corpo per ottenere un innalzamento unitario della sua temperatura ed è espressa dalla seguente relazione:

$$C = \frac{Q}{T_2 - T_1} \quad (3.6)$$

dove:

Q = calore assorbito (J);

T_1 e T_2 = temperatura (°C);

C = capacità termica (J °C⁻¹).

Unità di misura equivalente possono essere kcal °C⁻¹. Se è riferita all'unità di massa la capacità termica "massica" viene definita "calore specifico", secondo la relazione:

$$C_p = \frac{Q}{(T_2 - T_1)m} \quad (3.7)$$

dove:

C_p = calore specifico (J kg⁻¹ °C⁻¹);

Q = calore assorbito (J);

T_2 = temperatura finale (°C);

T_1 = temperatura iniziale (°C);

m = massa del materiale (kg).

Le unità di misura del calore specifico sono dunque J kg⁻¹ °C⁻¹ oppure le equivalenti kcal kg⁻¹ K⁻¹ e kcal kg⁻¹ °C⁻¹.

Tabella 3.4 Capacità termica massica (calore specifico) di alcuni materiali utilizzati per la fabbricazione di imballaggi (valori indicativi)

Materiale	Calore specifico ($\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
Legno	2,30-2,70
Polietilene a bassa densità	2,20-2,30
Sughero	1,70-2,05
Carta	1,34-1,88
Alluminio	0,88-0,96
Vetro	0,50-0,75
Acciaio inox	0,46-0,51

La capacità termica e il calore specifico dipendono dalla natura chimica della sostanza considerata e dalla temperatura. Sono costanti solo per piccole variazioni di temperatura e lontano dalle temperature di transizione di fase. Brusche variazioni del calore specifico di un materiale indicano, infatti, transizioni non solo di fase ma anche strutturale (per esempio, passaggio da stato cristallino a liquido o viceversa). Alcuni valori relativi al calore specifico di diversi materiali ed espressi in $\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ sono riportati in tabella 3.4.

Anche considerando questa proprietà, ci si rende conto della maggiore attitudine dei materiali metallici, e inorganici in generale, ai processi di trasferimento del calore: è infatti necessario fornire più energia ai materiali organici per innalzarne la temperatura. A questo proposito, tuttavia, non si deve trascurare il fatto che gli spessori dei materiali plastici e degli accoppiati di carta e plastica sono decisamente inferiori a quelli degli imballaggi metallici o dei contenitori di vetro (anche di un ordine di grandezza) e che la minore distanza da compiere e la massa inferiore da riscaldare può in definitiva rendere più conveniente trattare termicamente un imballaggio realizzato con questi materiali.

3.2.3 Coefficienti di dilatazione termica

Generalmente, tutti i solidi si espandono quando vengono riscaldati e si contraggono se raffreddati. È dunque importante conoscere come si comportano i materiali in relazione alla dilatazione termica. Questa proprietà è dovuta a un aumento della distanza media tra i costituenti del materiale (atomi, molecole, ioni) rispetto alle loro posizioni di equilibrio ed è inversamente proporzionale alla forza di legame. La dilatazione termica può essere quantificata attraverso i cosiddetti "coefficienti di dilatazione termica" che esprimono la variazione di una lunghezza, di una superficie o di un volume per una data variazione di temperatura a pressione costante. Le leggi che descrivono la dipendenza dalla temperatura della lunghezza o del volume di un provino di materiale, hanno la seguente forma generale:

$$l = l_0 (1 + \alpha T); \alpha = (l - l_0) / l_0 T \quad (3.8)$$

$$v = v_0 (1 + \beta T); \beta = (v - v_0) / v_0 T \quad (3.9)$$

dove:

l e v = lunghezza e volume alla temperatura T ($^\circ\text{C}$)

l_0 e v_0 = lunghezza e volume a 0 $^\circ\text{C}$

α e β = coefficienti di dilatazione lineare e cubica (volumica) ($^\circ\text{C}^{-1}$).

Tabella 3.5 Coefficiente di dilatazione termica (α) di alcuni materiali utilizzati per la fabbricazione di imballaggi (valori medi indicativi)

Materiale	α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
Polipropilene	120×10^{-6}
Nylon	80×10^{-6}
Polivinilcloruro	70×10^{-6}
Alluminio	24×10^{-6}
Acciaio inox	14×10^{-6}
Ferro	12×10^{-6}
Vetro comune	$8,5 \times 10^{-6}$
Vetro pirex	$3,6 \times 10^{-6}$
Legno	4×10^{-6}
Ceramica	3×10^{-6}

In genere α è 1/3 di β ; in ogni caso, entrambi i coefficienti dipendono dalla temperatura; è possibile ritrovare tabulati i valori medi relativi all'intervallo di temperatura 0-100 °C, alcuni di questi sono riportati nella tabella 3.5. Sebbene abbia notevole importanza pratica, non è comune trovare questa proprietà fisica nelle schede tecniche dei materiali di confezionamento. La riduzione di superficie di un materiale di avvolgimento, per un abbassamento di temperatura, può determinare sul prodotto confezionato forti tensioni, che possono anche causare danni meccanici al prodotto stesso; per contro, un aumento di temperatura nel corso della distribuzione può dilatare un imballaggio provocando deformazioni indesiderate. Infine, per imballaggi permeabili e con elevati coefficienti di dilatazione, l'alternanza caldo-freddo può determinare un "effetto polmone" con conseguenze rilevanti anche sugli scambi gassosi e, potenzialmente, sulla conservabilità del prodotto confezionato.

3.2.4 Intervallo utile di temperatura (intervallo di impiego)

La lavorazione e numerose applicazioni dei materiali richiedono la conoscenza dell'intervallo utile di impiego. Generalmente il limite inferiore di tale intervallo è rappresentato dalla temperatura di massima fragilità, in riferimento alle sollecitazioni meccaniche potenziali, e quello superiore dalla temperatura di distorsione o di rammollimento. Sono queste ultime temperature (le massime sopportabili) che vengono comunemente indicate tra le fondamentali caratteristiche dei materiali, anche perché – fatte poche eccezioni (vedi oltre la temperatura di transizione vetrosa) – quelle minime sono sempre al di sotto dei normali campi di impiego (tabella 3.6)

3.2.4.1 Intervallo di saldatura

È l'intervallo di temperatura nel quale è possibile effettuare una saldatura termica tra due punti dello stesso materiale. È una delle numerose proprietà fisiche definite di "macchinabilità"; la sua conoscenza e il suo controllo consentono, infatti, di ottimizzare le operazioni di confezionamento o di produzione dei contenitori sulle macchine automatiche destinate allo scopo. Un ampio intervallo permette, ovviamente, maggiore flessibilità di impiego e il corretto uso delle temperature di saldatura rende possibile raggiungere le più alte velocità di

Tabella 3.6 Intervalli di temperatura di impiego per alcuni materiali utilizzati per la fabbricazione di imballaggi (valori indicativi)

Materiale	T_{min} (°C)	T_{max} (°C)
Foglio di alluminio	-40	350
Acciaio inox	-40	350
Vetro	*	350
Polietilene ad alta densità	-90	80
Polietilene a bassa densità	-40	80
Polipropilene	0	110
Polivinilcloruro	-10	60
Polivinilcloruro plastificato	-50	60
Polistirene	-40	70
Poliestere amorfo	-60	65-70
Poliestere cristallizzato	-60	220-230
Poliammide (Nylon 6)	-40	80-120
Policarbonato	-190	130
Cellophane	-18	180

* Dipende dallo shock termico

confezionamento e, quindi, le maggiori produttività. D'altra parte, un intervallo di saldatura che corrisponde ad alte temperature comporterà maggiori spese energetiche delle operazioni connesse alla produzione degli imballaggi o al condizionamento dei prodotti.

3.2.4.2 Resistenza allo shock termico

La resistenza allo shock termico dipende essenzialmente dal coefficiente di dilatazione termica e di conducibilità termica di un materiale. Se la superficie e il cuore del materiale si raffreddano con velocità diverse a causa di uno sbalzo termico e se, durante il raffreddamento, si hanno forti variazioni di volume, vengono a crearsi stati tensionali che possono anche portare alla rottura del materiale. La frattura nasce dall'insorgere di tensioni meccaniche all'interno del materiale dovute anche a gradienti di temperatura o ad *anisotropicità del materiale*. I materiali, in particolare quelli fragili come il vetro, possono andare incontro a frattura in seguito a brusche variazioni di temperatura. I test di resistenza allo shock termico prevedono cicli di riscaldamento seguiti da rapidi raffreddamenti, fino alla rottura del pezzo o al raggiungimento di un prestabilito numero di cicli. La resistenza dei materiali viene valutata sulla base del numero e dell'ampiezza dei cicli a cui riescono a resistere.

3.2.5 Potere calorifico e contenuto energetico

Il potere calorifico corrisponde alla quantità di energia ricavabile per combustione dei materiali; le unità di misura impiegate per esprimerlo sono kJ g^{-1} (o gli equivalenti MJ kg^{-1}) e kcal g^{-1} . Naturalmente questa proprietà termica è di interesse esclusivo per i materiali organici per i quali è possibile una termo-distruzione e, potenzialmente, un recupero di energia in processi di smaltimento correttamente eseguiti. Questa caratteristica dei materiali, in effetti, può essere presa in considerazione nella valutazione globale dell'impatto ambientale

Tabella 3.7 Potere calorifico e contenuto energetico di alcuni materiali (valori indicativi)

Materiale	Contenuto energetico (MJ kg⁻¹)	Potere calorifico (MJ kg⁻¹)
Vetro	17,3	0
Foglio di alluminio	260	0
Banda stagnata	39	0
Materiali cellulosici	87	15-30
Polietilene/Polipropilene	68	34-46
Poliestere	97	19-30
Polistirene	94	32-42
Polivinilcloruro	59	15-21
Legno	-	16-20
Petrolio	-	38-43
Carbone	-	25-30
Rifiuti urbani	-	8-17

dei diversi materiali utilizzati e ha assunto recentemente notevole importanza. Per offrirne un'interpretazione più completa e comparata, nella tabella 3.7 vengono riportati i valori relativi ad alcuni materiali di confezionamento e ad alcuni combustibili, assieme al *contenuto energetico*, che rappresenta (espresso con le stesse unità di misura) l'energia totale richiesta per la loro produzione.

3.2.6 Temperature di transizione

Per transizione di fase si intende la trasformazione di un sistema termodinamico da una fase a un'altra. Le temperature di fusione, di cristallizzazione e di transizione vetrosa sono quelle che interessano maggiormente i materiali di packaging nel corso delle operazioni di produzione, trasformazione e lavorazione. Nel caso dell'alluminio può essere utile considerare anche la temperatura di evaporazione, ma a pressioni molto ridotte; infatti nell'operazione di metallizzazione l'alluminio viene depositato in strato sottilissimo su carte e film plastici condensando sulla loro superficie vapori del metallo generati in appositi impianti (vedi oltre la "tecnica di metallizzazione in alto vuoto").

La *temperatura di fusione* (T_m) è la temperatura alla quale, per un determinato valore di pressione (generalmente assunto pari a 1 atmosfera), fase solida e fase liquida coesistono in equilibrio termodinamico, cioè senza che vi sia transizione tra le due fasi. Tale temperatura è importante per tutti i materiali, organici e inorganici, e diventa fondamentale per quelli destinati a raggiungere una forma finale attraverso fasi di lavorazioni che prevedono la solidificazione a partire da un liquido o da un materiale semisolido. I materiali che hanno un'organizzazione cristallina presentano una temperatura di fusione ben precisa alla quale si ha il passaggio diretto dallo stato solido allo stato liquido. In questo caso, infatti, il calore assorbito dalla sostanza durante la fusione viene utilizzato per rompere i legami interatomici o intermolecolari che formano il reticolo cristallino. I materiali amorfi, come il vetro e molti polimeri plastici, presentano una struttura disordinata, analoga a quella dei liquidi. Questa loro caratteristica chimica fa sì che, in seguito al riscaldamento, prima rammolliscano e poi passino gradualmente allo stato liquido, senza manifestare una temperatura di fusione ben definita.

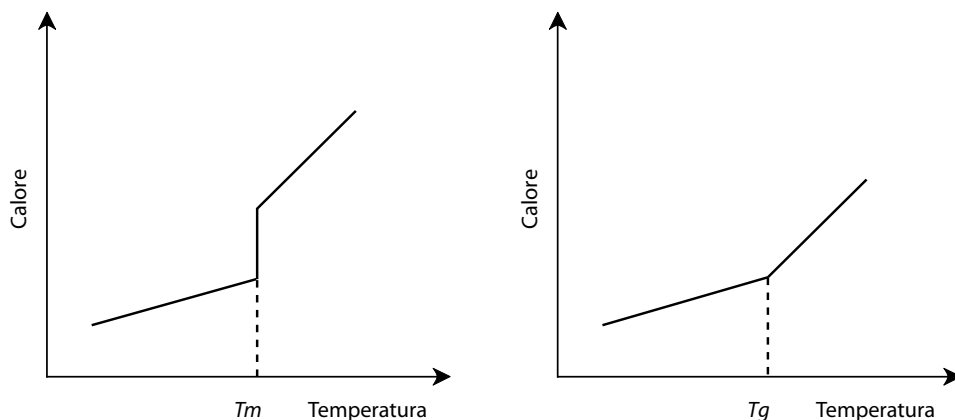


Figura 3.4 Relazione calore fornito-temperatura per un solido cristallino (a sinistra) e per un solido amorfo (a destra)

Per comprendere meglio questa caratteristica si può fare riferimento alla figura 3.4, nella quale è mostrata la relazione tra calore fornito e temperatura per un materiale solido completamente cristallino e uno completamente amorfo. I grafici mostrano la quantità di calore aggiunta al materiale (sull'asse delle ordinate) e la temperatura che si ottiene con una determinata quantità di calore (sull'asse delle ascisse). Per un materiale completamente cristallino (grafico di sinistra), la temperatura aumenta proporzionalmente al calore fornito, fino al raggiungimento della temperatura di fusione. La fusione richiede calore e durante tale processo l'aumento di temperatura si arresta (calore latente di fusione), per poi riprendere a fusione avvenuta. Per un materiale completamente amorfo il grafico che si ottiene è differente: in seguito al riscaldamento non si ha un'interruzione ma solo un aumento dell'inclinazione in corrispondenza della cosiddetta *temperatura di transizione vetrosa* (T_g).

Il diverso comportamento dei materiali che a temperatura ambiente si trovano allo stato cristallino e amorfo è da ascrivere ai moti termici tra gli atomi e le molecole dai quali sono costituiti. In un materiale, sia amorfo sia cristallino, allo stato solido le forze attrattive tra le particelle prevalgono sull'effetto dell'agitazione termica. Entro un certo intervallo di temperatura, la libertà di movimento rimane invariata. Se si somministra calore a un solido cristallino, l'energia delle particelle (atomi, molecole, ioni ecc.) aumenta, finché a una temperatura ben precisa (che corrisponde alla temperatura di fusione) acquista un valore sufficiente per allentare le forze attrattive tra i costituenti del materiale e rompere la struttura ordinata delle molecole, trasformando il solido in un liquido. Fornendo invece calore a un solido amorfo, l'energia delle particelle aumenta progressivamente e solo in corrispondenza della temperatura di transizione vetrosa (T_g) si raggiunge un'energia sufficiente per fare muovere in modo sincronizzato le molecole, senza che si abbia rottura netta della struttura. In corrispondenza della temperatura di transizione vetrosa si registrano, dunque, la minima mobilità delle molecole e una riduzione significativa del volume libero. In altre parole, a temperature inferiori a T_g il libero movimento delle molecole è impedito e il materiale si comporta da solido rigido (o vetroso) in una conformazione di minima energia. In questo stato il materiale è indeformabile e la sua viscosità è elevatissima. A temperature superiori a T_g il volume libero cresce rapidamente con la temperatura fornendo sufficiente spazio per il movimento

Tabella 3.8 Temperature di fusione e di transizione vetrosa per alcuni materiali utilizzati per la fabbricazione di imballaggi (valori indicativi)

Materiale	T fusione (°C)	T transizione vetrosa (°C)
Alluminio	660	–
Vetro	1.450*	1.450
Acciaio inox	1.430	–
Stagno	232	–
Polipropilene	160-180	–25/–20
Polivinilcloruro	212	87
Poliammide (Nylon 6.6)	210-260	50
Cellulosa	–	40
Polimetilacrilato (plexiglass)	100*	100
Polistirene atattico	94*	94
Polietilene ad alta densità	130-140	–110/–125
Polietilene a bassa densità	100-115	–90/–25
Polietilentereftalato	210-265	66-80
Policarbonato	220	150

* Materiale amorfo

delle molecole e il materiale si trova in uno stato gommoso caratterizzato da una viscosità elevata ma non quanto quella dello stato vetroso.

La temperatura di transizione vetrosa è dunque una temperatura molto importante per i materiali che, a temperatura ambiente, si trovano allo stato amorfo o semicristallino (che dunque presentano, nella loro struttura, sia zone cristalline sia zone amorfe). Come si è detto, per i polimeri amorfi o semicristallini non è possibile definire esattamente una temperatura di fusione (poiché il passaggio di stato non è netto, ma corrisponde a un progressivo rammollimento del materiale) e si indica, più convenientemente, un intervallo termico che corrisponde al comportamento viscoelastico del polimero e/o alla fusione dei cristalliti (zone del polimero con organizzazione cristallina). I polimeri amorfi che presentano zone di cristallinità sono dunque caratterizzati sia da una temperatura di transizione vetrosa sia da una temperatura di fusione. In particolare, la parte amorfa subirà solo la transizione vetrosa, mentre la parte cristallina solo la fusione.

Come si può dedurre dai dati riportati nella tabella 3.8, per alcuni materiali la temperatura di transizione vetrosa è positiva e anche superiore a quella ambientale, mentre per altri è abbondantemente inferiore a 0 °C. Alcuni polimeri, infatti, sono utilizzati a temperature superiori alla loro temperatura di transizione e altri a temperature inferiori. Le plastiche rigide, come il polistirene, negli impieghi più comuni sono utilizzate a temperature inferiori alla loro temperatura di transizione, ossia allo stato vetroso; infatti la T_g del polistirene (intorno a 100 °C) è molto superiore alla temperatura ambiente. Al contrario, polimeri come il polietilene e il polipropilene sono usati a temperature superiori alla loro T_g , cioè allo stato gommoso. Questa differenza, come già sottolineato, dipende dalla possibilità di movimento delle catene: una catena polimerica che si muove facilmente avrà una T_g molto bassa, mentre una che non si muove altrettanto facilmente ne avrà una molto alta. Infatti, più un polimero può muoversi facilmente, meno calore è necessario affinché le catene inizino a muoversi e a liberarsi dal rigido stato vetroso per passare allo stato gommoso. La temperatura di transizione vetrosa è dunque una grandezza propria di ogni polimero amorfo.

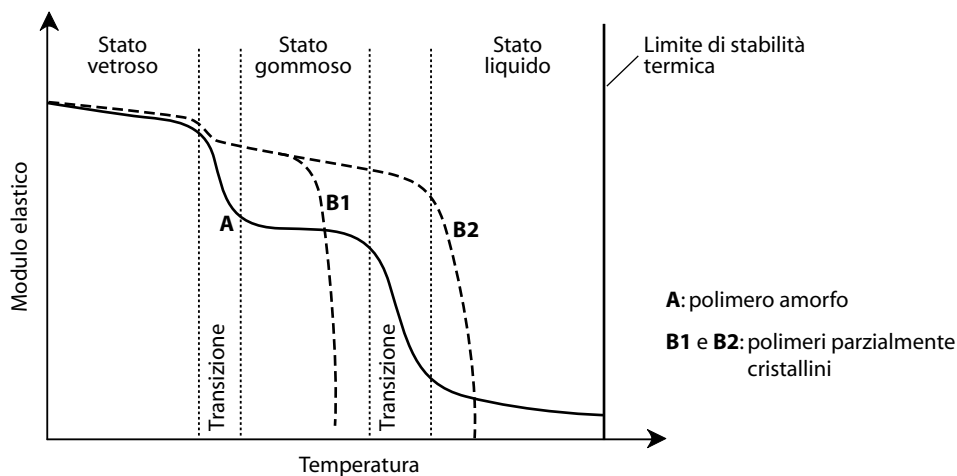


Figura 3.5 Influenza della temperatura sul profilo di rigidità di polimeri amorfi e semicristallini caratterizzati da stesso valore di T_g .

Se il polimero presenta un valore di T_g più elevato di quello desiderato per la sua lavorabilità, è sufficiente utilizzare sostanze o materiali plastificanti. Si tratta di piccole molecole che, disponendosi tra le catene polimeriche, le distanziano una dall'altra determinando un aumento del volume libero. In tali condizioni le catene hanno possibilità di scorrere una vicino all'altra e quindi di muoversi liberamente a temperature inferiori rispetto a quelle che sarebbero necessarie senza l'aggiunta di plastificante. In questo modo un polimero può essere reso più flessibile e più facile da lavorare abbassandone la T_g .

Molte caratteristiche fisiche dei materiali dipendono dalla T_g : in particolare il comportamento in risposta a sollecitazione meccanica, i fenomeni di diffusione e il comportamento alle variazioni di temperatura. Per esempio, per quanto concerne i polimeri termoplastici (vedi cap. 8), al crescere della temperatura il comportamento meccanico di un polimero amorfo si differenzia molto da quello dei polimeri parzialmente o altamente cristallini (figura 3.5).

A temperature inferiori alla loro T_g i polimeri hanno modulo di elasticità (vedi par. 3.3.2.1) simile a quello del vetro e mostrano pertanto elevata rigidità. In tali condizioni non possono essere plasmati nella forma voluta. A temperature superiori alla T_g , il modulo di elasticità di un polimero semicristallino può variare anche di poco; in genere tale parametro meccanico subisce una prima diminuzione alla T_g , ma il materiale continua a mantenerlo significativamente diverso da zero fino alla T_m . Infine, al raggiungimento della T_m il modulo elastico tende rapidamente a zero, poiché a queste temperature il materiale si comporta come liquido viscoso.

Nei polimeri amorfi il modulo di elasticità subisce una drastica diminuzione per temperature superiori alla T_g , in corrispondenza della quale il materiale si comporta come liquido viscoso e presenta un modulo di rigidità trascurabile. In altre parole, si riduce la forza necessaria per determinare una deformazione del materiale che quindi riduce la sua rigidità. Nello stato gommoso, dunque, sotto l'effetto di forze esterne, le catene del polimero amorfo, essendo in uno stato altamente disordinato, possono cambiare conformazioni e il materiale subisce una deformazione reversibile. Grazie a queste caratteristiche il polimero termoplastico può essere modellato nella forma voluta.

3.3 Proprietà meccaniche

Comprendono quelle proprietà fisiche che descrivono il comportamento di un solido sottoposto all'applicazione di una forza, che può essere rappresentata dal peso del corpo stesso o da una sollecitazione esterna. La conoscenza delle prestazioni meccaniche di un imballaggio, o di un materiale di confezionamento, è sempre di fondamentale importanza per valutare l'idoneità a un determinato impiego e per discriminare tra materiali simili; le prestazioni meccaniche sono, infatti, sempre comprese nelle specifiche tecniche che accompagnano la fornitura di un materiale e comprendono le proprietà di frizione e di resistenza, la risposta a stress dinamici e la durezza.

3.3.1 Resistenza allo scorrimento (frizione)

La resistenza allo scorrimento di una superficie su un'altra, definita anche frizione, è una proprietà di notevole interesse per molti materiali e oggetti destinati al contatto con alimenti. La riduzione delle forze di frizione tra due materiali o tra un materiale e una superficie di contatto consente, infatti, di raggiungere le massime velocità sulle macchine di stampa, di laminazione e confezionamento e di evitare possibili "fermi macchina" dovuti, per esempio, a rotture del materiale durante lo svolgimento da una bobina, il trascinarsi sulle parti di una macchina ecc. Altre volte, invece, è importante aumentare il livello di frizione per evitare fenomeni di scivolamento indesiderati: per esempio, quando si ricorre all'impilamento di diverse confezioni nel corso delle operazioni di stoccaggio e di distribuzione. Il differente comportamento dei materiali allo scorrimento è da ascrivere a molteplici ragioni anche molto diverse, come la finitura superficiale, la natura chimica, le cariche elettrostatiche di superficie, l'affioramento di additivi o ingredienti e la stampa.

La resistenza di un materiale allo scorrimento viene generalmente espressa attraverso il coefficiente di frizione (indicato come COF), definibile come il rapporto tra la forza di frizione tangenziale che si oppone allo scorrimento (F) e la forza peso (F_g) che agisce perpendicolarmente sulle due superfici di contatto; di conseguenza, essendo un rapporto tra due forze, il COF è una grandezza adimensionale:

$$COF(f) = \frac{F}{F_g} \quad (3.10)$$

In realtà è possibile distinguere tra COF statico e COF dinamico: il coefficiente di frizione statico fa riferimento alla forza F necessaria per vincere la resistenza all'avvio del movimento di una superficie sull'altra, mentre il coefficiente di frizione dinamico si riferisce alla forza F necessaria per vincere la resistenza al movimento di una superficie che si muove su un'altra a una determinata velocità. I due coefficienti di frizione sono quindi espressi mediante la stessa equazione.

Per misurare il coefficiente di frizione si impiegano modalità di misura descritte in norme ufficiali. La più frequentemente utilizzata prevede che il film o il materiale da testare venga avvolto intorno a una slitta costituita da un blocchetto metallico di peso noto, connesso mediante una corda alla cella di carico di un dinamometro (figura 3.6). La cella di carico si muove a velocità nota e costante favorendo lo scivolamento della slitta sul piano di scorrimento. Il dinamometro registra lo sforzo di resistenza allo scorrimento della slitta: il rapporto tra la resistenza misurata all'inizio della prova (F) e il peso della slitta (F_g) corrisponde al COF statico, mentre quello tra la resistenza durante il movimento costante della slitta e il

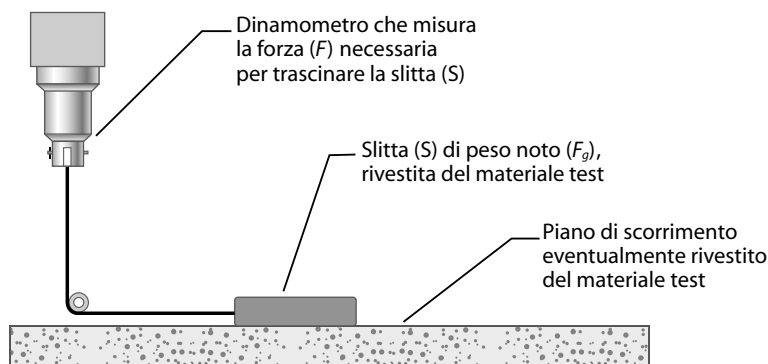


Figura 3.6 Modalità di misura del coefficiente di frizione (COF).

Tabella 3.9 Valori indicativi del coefficiente di frizione dinamico (film su film) di alcuni materiali di confezionamento

Materiale	Coefficiente di frizione
Cellophane	4,5
Polipropilene orientato	0,94
Poliestere	0,45-0,38
Polipropilene	0,34
Carta 76 μm	0,3
Polivinilcloruro 25 μm	0,27
Polietilene a bassa densità 64 μm	0,12

peso di quest'ultima, rappresenta il COF dinamico. Se il piano di scorrimento è rivestito dal materiale test si parla di COF film su film; in caso contrario si parla di COF film su materiale del piano di scorrimento. Nella tabella 3.9 sono riportati, a titolo d'esempio, i valori del coefficiente di frizione per alcuni materiali di confezionamento.

3.3.2 Resistenza meccanica

Per descrivere il comportamento di un solido in risposta alla sollecitazione di una forza applicata, è conveniente classificare dapprima il tipo e la direzione della forza in questione. A tale scopo si possono definire statiche quelle forze applicate in modo costante e per tempi discreti (per esempio, le forze che si esercitano durante l'impilamento sugli scaffali o sui piani di carico o in seguito a un avvolgimento in termoretraibile o con altri mezzi di contenimento o, ancora, per effetto della pressione interna, come nel caso delle bevande addizionate di anidride carbonica). Le forze dinamiche sono invece quelle che si esauriscono in breve tempo, come in conseguenza di un urto, di una caduta o di una vibrazione. Se si considera, invece, la direzione di applicazione, le forze che interessano i materiali di imballaggio possono essere classificate come forze di trazione, di compressione e di taglio.

Nelle situazioni reali (confezionamento, movimentazione, trasporto, stoccaggio ecc.) sono possibili, e anzi probabili, tutte le diverse combinazioni (di tipo e direzione) di appli-

cazione di una forza su un imballaggio. Tuttavia, quando si valuta la resistenza meccanica di un materiale, si ricorre per lo più a prove di sollecitazione mediante trazione, sia perché consentono di visualizzare più facilmente il comportamento meccanico sia perché, in genere, tutti i materiali si dimostrano più deboli in queste prove che in quelle di compressione. I test di compressione sono invece insostituibili quando si intende valutare non il materiale ma un manufatto finito (come scatole, casse, barattoli ecc.), in particolare per simularne l'impiego reale.

3.3.2.1 Resistenza alla trazione

Il test di resistenza alla trazione consiste nel sottoporre un provino, di forma e dimensioni rispondenti a precise specifiche, a una forza di trazione lungo il suo asse, con una velocità di deformazione controllata, sino alla rottura. La prova viene solitamente realizzata con uno strumento chiamato dinamometro. Il dinamometro tira, con un movimento lento e costante, un provino del materiale vincolato alle estremità a una coppia di pinze (afferraggi), fissate rispettivamente alla base dello strumento e su una traversa mobile (figura 3.7). Mentre il provino viene sottoposto a trazione, il dinamometro misura la forza (F) che sta esercitando e l'allungamento subito dal provino. I risultati potrebbero essere riportati in un grafico forza-lunghezza, ma in tal modo sarebbero influenzati, per esempio, dal diametro o dallo spessore del provino.

Per far sì che i valori di un test siano indipendenti dalla geometria del provino, durante la prova si preferisce misurare la sollecitazione esercitata sul provino (chiamata anche sforzo o stress) e la deformazione (o *strain*). Lo sforzo (σ) è il rapporto tra la forza esercitata e la superficie di applicazione, corrispondente alla sezione trasversale del provino, cioè al prodotto della larghezza per lo spessore.

$$\text{Stress}(\sigma) = \frac{F}{A} \quad (3.11)$$

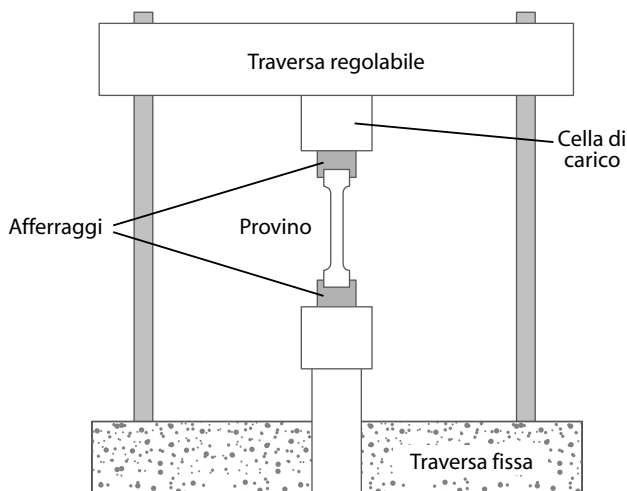


Figura 3.7 Prova di trazione mediante dinamometro.

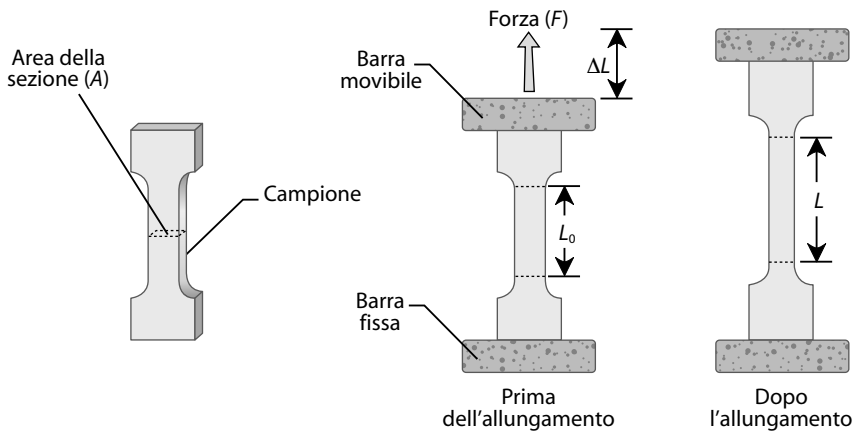


Figura 3.8 Geometria del provino realizzato con il materiale da sottoporre alle prove di trazione.

La deformazione (ϵ) non ha dimensioni, in quanto definita dal rapporto tra la variazione di lunghezza ($L - L_0$) e la dimensione originale (L_0) (figura 3.8).

$$\text{Deformazione}(\epsilon) = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3.12)$$

Per mantenere costante la velocità, lo strumento incrementa la quantità di forza e, ovviamente, aumenta la sollecitazione sul provino fino alla rottura di quest'ultimo. La massima sollecitazione registrata, che non corrisponde necessariamente a quella di rottura, è la resistenza a trazione del materiale. Il modo più conveniente per descrivere il comportamento del provino sottoposto a una sollecitazione tensile (di trazione) è, come detto, rappresentarlo in un diagramma sforzo-deformazione (stress/strain) (figura 3.9).

Osservando la curva sforzo/deformazione si possono individuare due zone caratteristiche.

- Zona di *deformazione elastica*: corrisponde al tratto lineare della curva (con pendenza costante) e rappresenta deformazioni reversibili del materiale. In altre parole, se il provino viene scaricato riprende la sua lunghezza iniziale. Questa fase termina nel punto E che corrisponde al *limite di elasticità*, punto in cui comincia a cambiare, diminuendo, la pendenza della curva.
- Zona di *deformazione plastica*: dopo il limite di elasticità la pendenza della curva diminuisce sensibilmente. La deformazione si compone ora di una parte plastica, che non scompare eliminando la tensione e che corrisponde circa allo scostamento della curva dalla legge di proporzionalità. Si assume come parametro di questa transizione la tensione che produce uno scostamento dalla proporzionalità dello 0,2%. Per alcuni materiali la pendenza si azzerava molto rapidamente in corrispondenza della sollecitazione di snervamento (Y), per altri continua a diminuire progressivamente per lo stiramento del materiale che prosegue, in ogni caso, fino alla rottura del provino (B) che può avvenire anche per sollecitazioni inferiori alla massima registrabile durante la prova.

Per una caratterizzazione oggettiva dei materiali in forma piana (quali film, foglie o lamine di carta, plastica o metallo), la curva sforzo/deformazione consente di ricavare alcuni parametri quantitativi, spesso usati per definire le specifiche tecniche dei materiali (figura 3.10).

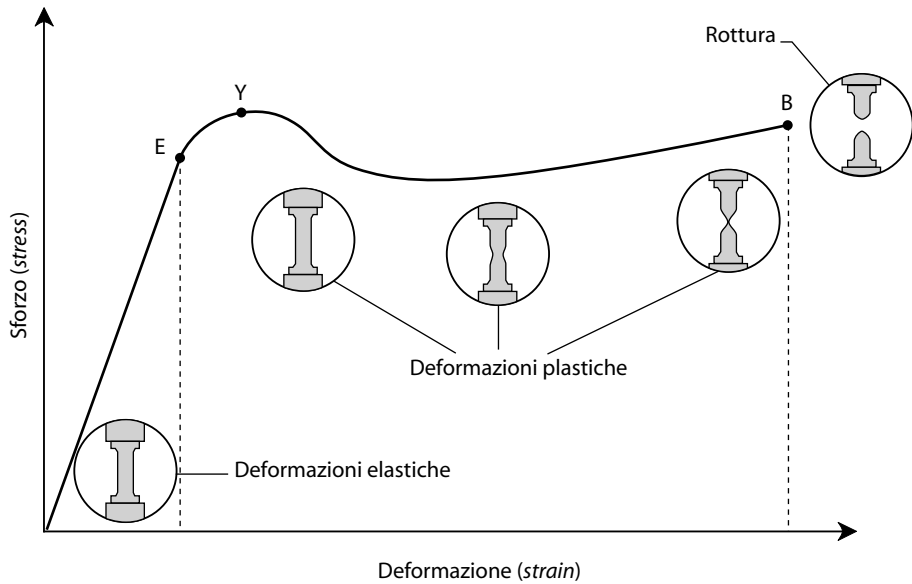


Figura 3.9 Comportamento di un provino sottoposto a trazione (curva sforzo/deformazione).

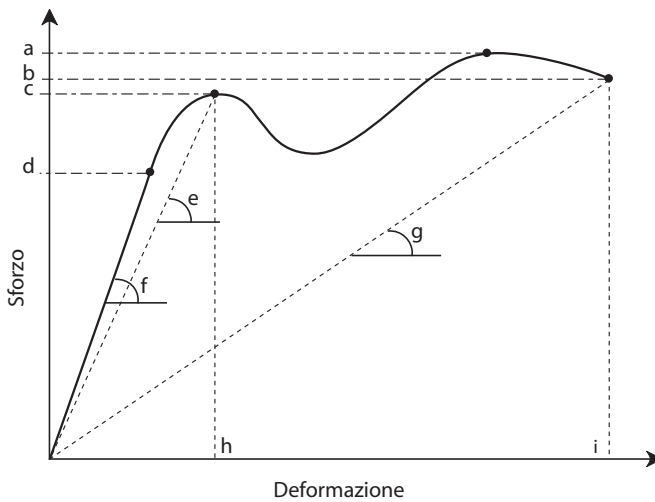


Figura 3.10 Principali parametri ricavabili da una curva sforzo/deformazione in un test di trazione. **a:** Resistenza alla trazione (N mm^{-2}); **b:** limite di rottura (N mm^{-2}); **c:** limite di snervamento (N mm^{-2}); **d:** limite di elasticità (N mm^{-2}); **e:** modulo di snervamento (N mm^{-2}); **f:** modulo di elasticità (N mm^{-2}); **g:** modulo di rottura (N mm^{-2}); **h:** allungamento allo snervamento (%); **i:** allungamento alla rottura (%).

Modulo di elasticità (modulo di Young). Espresso generalmente in MPa (N mm^{-2}); dipende dalla capacità dei legami atomici di deformarsi: durante la deformazione i legami vengono allungati ma non rotti. Il modulo di elasticità è pari al rapporto tra lo sforzo e la corrispondente deformazione sotto il limite di proporzionalità, rapporto che è costante nel tratto lineare della curva. Rappresenta una misura dell'elasticità (più basso è il modulo, maggiore è l'elasticità del materiale) e, al tempo stesso, della rigidità di un materiale (più elevato è il modulo, maggiore è la rigidità del materiale). Quando i materiali non mostrano una relazione lineare tra sforzo e deformazione, anche per sollecitazioni molto minori al limite di snervamento, si considera come modulo elastico la pendenza della tangente alla curva in corrispondenza di una piccola deformazione (spesso il 2%).

Limite di elasticità (limite di proporzionalità). Espresso in MPa (N mm^{-2}); rappresenta la massima sollecitazione che il materiale è capace di sostenere senza che si verifichi una deviazione dalla proporzionalità diretta tra sforzo e deformazione. Raggiunto il limite della deformazione elastica, un materiale si può comportare in due modi:

- il campione si rompe; nei materiali fragili, quando la forza applicata supera la forza di legame, si provoca la rottura catastrofica per l'impossibilità degli atomi di scorrere; in questo caso, si può definire il *punto di frattura fragile*;
- il campione continua a deformarsi, e la deformazione persiste anche dopo che la forza agente viene annullata.

Limite di snervamento. Espresso in MPa (N mm^{-2}). Rappresenta la sollecitazione che corrisponde alla prima significativa inflessione della curva, quando a un aumento della deformazione non corrisponde un aumento della sollecitazione e la pendenza si annulla.

Modulo di snervamento. È la pendenza del segmento lineare che unisce l'origine del diagramma al limite di snervamento ed è espresso generalmente in MPa (N mm^{-2}).

Allungamento alla rottura (o duttilità). Corrisponde alla percentuale di allungamento rispetto alla dimensione originale (deformazione) al momento della rottura del provino. A volte viene registrato anche l'*allungamento allo snervamento* o al *massimo sforzo*.

Resistenza alla trazione (sollecitazione massima). Misurata in MPa (N mm^{-2}); rappresenta la massima sollecitazione registrata, che non corrisponde necessariamente a quella di rottura.

Limite di rottura (sollecitazione di rottura). Misurato in MPa (N mm^{-2}); è lo sforzo registrato al momento della rottura del provino.

Modulo di rottura. È la pendenza del segmento lineare che unisce l'origine del diagramma al limite di rottura ed è espresso generalmente in MPa (N mm^{-2}).

Tenacità. È una misura dell'energia che un provino può assorbire prima di rompersi. Si ricava dal rapporto tra l'energia necessaria alla rottura (che corrisponde all'area sottesa alla curva) e la superficie del provino. Si esprime in $\text{N mm}^{-2} \text{ m}$ ossia in J mm^{-2} .

Resilienza. Misura il valore massimo di energia sotto forma di lavoro che può essere immagazzinata in campo elastico senza danni per il materiale, e che viene restituita scaricando il materiale stesso. In pratica si tratta dell'area sottesa dalla curva sforzo-deformazione nella parte elastica e si esprime in J mm^{-2} .

Fragilità. Se la zona di deformazione plastica è assente o molto ridotta, il punto di rottura coincide con il limite di elasticità (misurato in MPa o N mm^{-2}) e il materiale si dice fragile.

Il grafico riportato in figura 3.11 mette a confronto i diagrammi sforzo/deformazione per materiali con diverse caratteristiche di resistenza, duttilità e resilienza. La curva A è tipica di

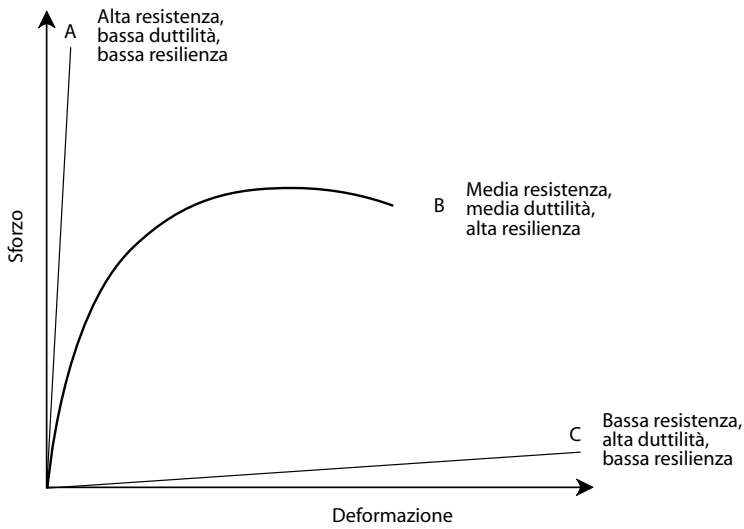


Figura 3.11 Curve di sforzo/deformazione per materiali con diversa resistenza, duttilità e resilienza.

un solido caratterizzato da alta resistenza, bassa duttilità e bassa resilienza; in questo caso, infatti, la rottura richiede molta forza ma non molta energia, come si può osservare dalla piccola area sottesa alla curva; tale campione, inoltre, presenta bassa duttilità, poiché non si allunga molto prima della rottura. Un simile materiale è resistente, ma non si deforma molto prima di rompersi ed è definito fragile. La curva B si riferisce a un campione resistente e tenace. Questo materiale non è resistente quanto quello rappresentato dalla curva A, ma l'area

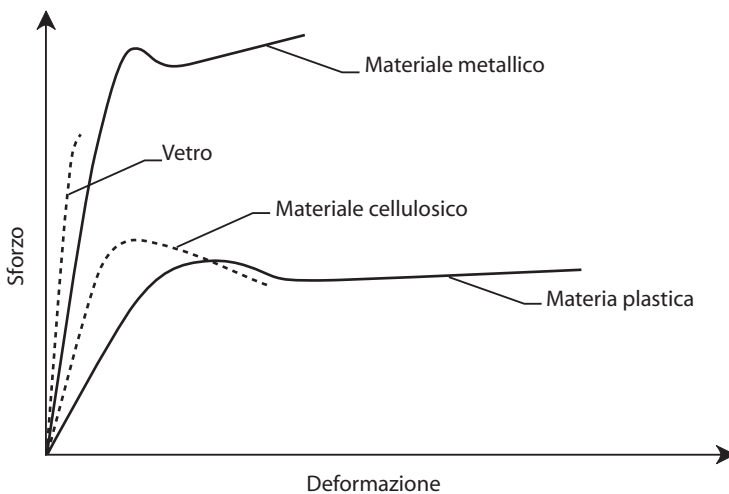


Figura 3.12 Curve di sforzo/deformazione per diversi materiali (comportamento ideale).

Tabella 3.10 Alcuni valori delle principali proprietà meccaniche misurate in test di resistenza alla trazione di alcuni materiali di confezionamento (valori indicativi)

<i>Materiale</i>	<i>Modulo di elasticità (MPa)</i>	<i>Allungamento alla rottura (%)</i>	<i>Limite di rottura (MPa)</i>
Poliestere 23 μm	4.000-5.000	50-120	170-270
Polipropilene	2.000-3.500	600-800	35-50
Alluminio	70.000	–	70-210
Banda stagnata	1.800.000	330-740	
Carta Kraft	–	–	25-115
Vetro	70.000	–	70

sottesa alla curva B è maggiore di quella sottesa alla curva A: in altre parole, il campione B assorbe più energia del campione A. Prima di rompersi il campione B si allunga molto più del campione A e tale deformazione gli permette di dissipare energia. Se un campione non può deformarsi, l'energia non viene dissipata e si ha la rottura. Il campione C, infine, è caratterizzato da bassa resistenza e bassa tenacità (come si può verificare, rispettivamente, dal basso valore di sforzo e dal basso valore dell'area sottesa) e da un'alta duttilità, avendo la capacità di allungarsi molto prima della rottura.

La figura 3.12 propone, in forma schematica e non quantitativa, i diagrammi sforzo/deformazione delle materie plastiche, di quelle cellulosiche, del vetro e dei metalli, per enfatizzare il diverso comportamento e le differenti caratteristiche generali di resistenza meccanica dei materiali impiegati per il confezionamento alimentare. La tabella 3.10 riporta i valori delle principali proprietà meccaniche dei più comuni materiali di confezionamento.

3.3.2.2 Amplificatori di sforzo

Le discontinuità, volontarie o involontarie del materiale (come microfori, tacche, spigoli e cambi di spessore), possono rappresentare dei punti di amplificazione dello sforzo applicato.

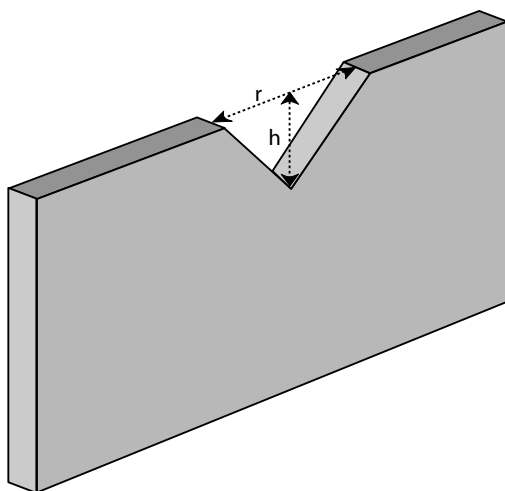


Figura 3.13 Amplificatore di sforzo: esempio di intaglio a "V".

Queste situazioni sono molto critiche per oggetti fragili, come le bottiglie di vetro o gli oggetti di ceramica, ma possono anche essere sfruttate in positivo nella realizzazione di sistemi di apertura facilitata (*easy open*).

Il fattore di intensità K (o di amplificazione dello sforzo, *stress intensity factor*), il cui superamento porta alla propagazione della rottura, dipende dalla forza applicata e dalla geometria del difetto. I casi più studiati sono quelli degli intagli a “V”, dove K dipende sia dalla lunghezza (h), sia dall’apertura (r) (figura 3.13). In forma approssimata K può essere definito dalla 3.13, che mostra come lo sforzo applicato (σ) sulla discontinuità comporti un’amplificazione proporzionale alla sua lunghezza.

$$K = \sigma\sqrt{\pi h} \quad (3.13)$$

3.3.2.3 Resistenza allo strappo

La resistenza allo strappo è una proprietà molto importante per i materiali di packaging che si trovano in forma piana. Viene infatti frequentemente misurata per i materiali cellulósici e per quelli plastici e spesso si ricava nelle due direzioni lungo le quali può essere stirato il materiale durante la fase di produzione, ossia la direzione macchina e quella trasversale. Durante una produzione continua la direzione macchina determina l’allineamento delle macromolecole (per i materiali plastici) e delle fibre (per la carta) e influenza, conseguentemente, la resistenza del materiale piano.

Test standard consentono di valutare la forza (N) per iniziare o per propagare lo strappo in un campione di opportuna forma e l’energia (espressa in N m, ossia in J) assorbita dal campione durante la formazione o la propagazione di uno strappo. Per valutare la resistenza allo strappo iniziale viene generalmente utilizzato un dinamometro, mentre per misurare la forza richiesta per propagare una fessura o una discontinuità esistente è impiegato un pendolo a impatto (figura 3.14).

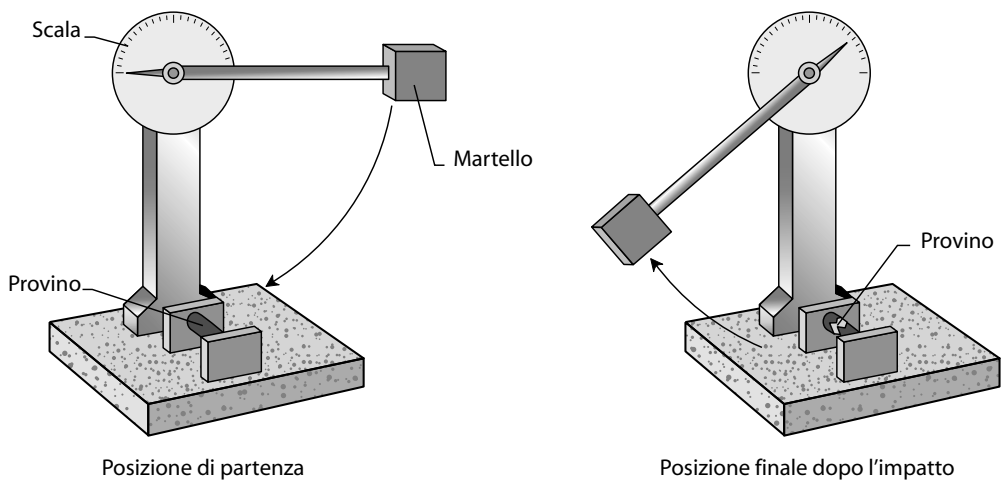


Figura 3.14 Resistenza allo strappo o all’impatto mediante strumento a pendolo.

3.3.2.4 Resistenza allo scoppio

La resistenza allo scoppio consente di conoscere il valore della pressione richiesta per ottenere la rottura del materiale in condizioni standard ed è generalmente espressa in kPa. È una caratteristica che dipende dalle proprietà tensili del materiale. La pressione viene applicata a velocità bassa e costante e può essere di tipo idraulico o pneumatico a seconda del materiale da analizzare. Il test viene realizzato sia su materiali piani (carta, cartone, film, fogli ecc.) sia su imballaggi finiti rigidi e flessibili. Per i primi si utilizza generalmente uno strumento capace di misurare la massima pressione (generata da una pompa a fluido) che un provino, serrato tra due corone circolari, è in grado di sopportare prima dello scoppio. La conoscenza di tale proprietà è spesso necessaria per le bottiglie in vetro, al fine di stabilire la resistenza a pressioni che vengono esercitate internamente. La resistenza allo scoppio consente pertanto di prevedere le prestazioni del materiale o dell'imballaggio durante l'utilizzo o di rilevare la presenza di difetti nascosti o invisibili in grado di compromettere la funzionalità del packaging.

3.3.2.5 Resistenza allo snervamento (*creep resistance*)

Il *creep* è la lenta deformazione, tempo dipendente, sotto un carico costante. Si tratta di un fenomeno ricorrente nei prodotti sottoposti a impilamento (*creep by external forces*), ma anche in prodotti contenenti liquidi sotto pressione (*creep by internal forces*), o durante riscaldamento che possono aumentare la pressione interna. Poiché dipende dal tempo, la resistenza allo snervamento può essere utilmente correlata alla vita commerciale della confezione e, in alcuni casi, anche del prodotto confezionato. Infatti la vita commerciale di un prodotto può essere limitata a causa della bassa resistenza allo snervamento dell'imballaggio.

3.3.2.6 Resistenza delle saldature

Le cause che determinano una mancata ermeticità di una confezione sono numerose e difficilmente prevedibili; tra esse, i difetti di saldatura occupano una posizione di primo piano. Ma anche in assenza di difetti di saldatura possono manifestarsi problemi, soprattutto se le saldature vengono sollecitate prima che abbiano avuto il tempo necessario per raffreddarsi, quando sono ancora molto sensibili e deboli. È quanto può accadere nelle macchine di confezionamento automatiche (vedi cap. 11) quando la saldatura neoformata viene immediatamente sollecitata dall'introduzione del prodotto o da un'azione di termoretrazione. È pertanto di estrema utilità conoscere la resistenza delle saldature a caldo e, in alcuni casi, anche in presenza di sporco, ossia di residui alimentari (polveri, liquidi ecc.) che potrebbero ridurre l'efficacia della saldatura. Per valutare tali proprietà si utilizzano strumenti in grado di misurare la forza di una saldatura calda immediatamente dopo la sua creazione e prima che il materiale sia raffreddato e abbia raggiunto la stabilità e, quindi, la sua forza massima. Gli strumenti impiegati a tale scopo sono in grado di simulare una macchina confezionatrice automatica a barra calda e possono essere programmati in funzione di diversi parametri (temperatura di saldatura, pressione di saldatura, tempo di saldatura ecc.). Dopo aver generato una saldatura, lo strumento provvede ad aprirla misurando nel contempo la forza necessaria a compiere tale azione.

3.3.2.7 Altre prove di resistenza meccanica

Con prove diverse, spesso di carattere empirico ma comunque descritte in norme ufficiali e standard internazionali, si valutano molte altre proprietà di resistenza meccanica, di impiego meno frequente ma non di minore importanza:

- prova di perforazione;
- prova di durezza per penetrazione;
- prova di fatica per torsione;
- prova di resistenza alla compressione e alla flessione;
- prova di impilamento.

In generale si tratta di test di resistenza meccanica, specifici per determinati materiali o oggetti finiti, che simulano reali condizioni di impiego o situazioni nelle quali l’imballaggio può trovarsi nel corso del trasporto o del suo utilizzo.

3.3.3 Proprietà relative a sollecitazioni dinamiche

Le sollecitazioni dinamiche sono quelle che più frequentemente causano danneggiamenti dei prodotti confezionati e che, per loro natura, è più difficile prevedere e tenere sotto controllo. Come già anticipato, corrispondono alle vibrazioni e agli impatti (urti, cadute o shock) che possono interessare i prodotti alimentari confezionati in tutte le fasi della loro distribuzione e del loro impiego. Lo studio di questi fenomeni e la progettazione di idonei sistemi di protezione sono molto più avanzati nel settore dei cosiddetti “beni durevoli”, prodotti non alimentari, costosi, spesso fragili, a volte persino pericolosi.

3.3.3.1 Vibrazioni

Corrispondono all’applicazione ripetuta di sollecitazioni compressive e tensili e interessano tutti i prodotti che subiscono un trasporto, qualunque sia il mezzo di trasporto utilizzato. La vibrazione descrive l’oscillazione o il movimento intorno a un punto di riferimento fisso. La distanza dal punto di riferimento è l’*ampiezza* e il numero di oscillazioni al secondo è la *frequenza* espressa in hertz (Hz). La frequenza e l’intensità di queste sollecitazioni sono però diverse da caso a caso (come risulta dalla tabella 3.11) ed esistono protocolli sperimentali per simulare, su speciali piattaforme vibranti, le sollecitazioni vibrazionali che caratterizzano il trasporto via mare, via aerea, su gomma e su rotaia.

Tabella 3.11 Range di frequenza delle vibrazioni durante comuni condizioni di trasporto

Mezzo di trasporto	Condizioni di trasporto e fonti di vibrazione	Range di frequenza (Hz)
Autocarro	Viaggio in autostrada:	
	– sospensioni	2-10
	– pneumatici	15-20
	– telaio ecc.	20-70
Ferrovia	Trasporto su vagoni:	
	– sospensioni	2-7
	– struttura	50-70
	– giunzioni tra rotaie	30-300
Aereo	– urti da atterraggio	2
	– struttura	1-10
	– piano di carico	2-200
	– attrezzatura fissa	<2.000

Queste prove vengono regolarmente condotte per collaudare gli imballaggi di armi, esplosivi, strumenti elettronici eccetera, ma potrebbero trovare utile impiego anche per ottimizzare il packaging alimentare. Si suppone, infatti, che molti alimenti possano essere sensibili a questo tipo di sollecitazioni; per esempio: le emulsioni, che possono andare incontro a destabilizzazione; alcuni prodotti particolati, che possono dare luogo ad agglomerazioni; quelli più fragili, che possono danneggiarsi; quelli a struttura complessa, come molti prodotti vegetali. La presenza di spazi liberi nella confezione o all'interno del prodotto, inoltre, determina sempre un'amplificazione degli effetti delle vibrazioni. La protezione che l'imballaggio può offrire in questo caso corrisponde a un'azione di assorbimento delle vibrazioni e può prevenire possibili fenomeni di risonanza che renderebbero pericolose vibrazioni che diversamente non avrebbero alcun effetto. Questa protezione dipende dalla natura del materiale e dalla frequenza e dall'intensità delle sollecitazioni vibrazionali.

3.3.3.2 Impatti

Urti e cadute sono sicuramente la causa più comune e frequente di danneggiamenti meccanici di qualsiasi prodotto confezionato e non sorprenderà che per studiare tali sollecitazioni e mitigarne gli effetti esistano ormai molte conoscenze e tecniche consolidate. Le sollecitazioni dinamiche da impatti, al contrario di quelle statiche, sono processi che comportano il trasferimento di energia, determinando nei materiali rapide onde di forze e di deformazioni variabili che possono, inoltre, essere amplificate, ridotte e riflesse dalla particolare organizzazione del prodotto confezionato e del suo imballaggio. La descrizione dei fenomeni in gioco e della necessaria protezione è pertanto piuttosto complessa e variabile a seconda dei casi.

La resistenza all'impatto di un materiale, caratteristica meccanica indicata anche con il termine *resilienza*, può essere misurata con uno strumento a pendolo (vedi figura 3.14, p. 47) e corrisponde all'energia necessaria per rompere un provino di forma definita per mezzo di una "mazza" a pendolo. L'energia dissipata nell'urto, quella necessaria per rompere il provino, sarà pari alla differenza tra l'energia potenziale che il pendolo aveva alla partenza e quella residua dopo la rottura; si potrà pertanto scrivere:

$$E_d = E_p - E_r \quad (3.14)$$

dove E_d , E_p ed E_r sono, rispettivamente, le energie dissipata, potenziale e residua. Conoscendo la massa del pendolo e la sua altezza dal piano, alla partenza e dopo la rottura le energie in gioco potranno scriversi come:

$$E_p = Wgh_1 \quad (3.15)$$

$$E_r = Wgh_2 \quad (3.16)$$

$$E_d = (h_1 - h_2) Wg \quad (3.17)$$

dove:

W = massa del pendolo (kg)

g = accelerazione di gravità ($m\ s^{-2}$)

h_1, h_2 = altezze del pendolo prima e dopo l'urto (m)

E_d, E_p, E_r = energia dissipata, potenziale e residua ($kg\ m\ s^{-2}\ m; J$)

Le altezze del pendolo possono essere ricavate da calcoli trigonometrici. Infatti – conoscendo la sua lunghezza L (m) e gli angoli α e β che forma con l'asse dello strumento all'inizio del test e dopo la rottura del campione – si potrà assumere che:

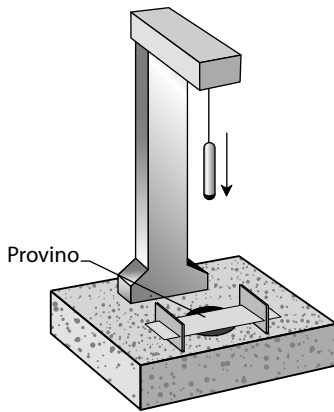


Figura 3.15 Valutazione della resistenza all'impatto mediante strumento a caduta di dardo.

$$h_1 = L (1 - \cos \alpha) \quad (3.18)$$

$$h_2 = L (1 - \cos \beta) \quad (3.19)$$

da cui deriverà:

$$E_d = (\cos \beta - \cos \alpha) W g L \quad (3.20)$$

Un altro metodo, piuttosto diffuso, per valutare la resistenza all'urto è quello detto a caduta di dardo (figura 3.15). In questo caso si misura la massa (W) di un percussore a forma di dardo che cade da un'altezza prestabilita e rompe il 50% dei provini in esame. Il provino circolare è mantenuto teso alla base dello strumento e una serie di dischi di acciaio consentono di variare la massa del dardo da 15 a 2000 g. I risultati dipendono dallo spessore del provino cui devono essere obbligatoriamente riferiti. Le percentuali di rotture sono poste in diagramma per le diverse masse del dardo, estrapolando, per regressione lineare, il valore di massa che corrisponde al 50% delle rotture.

3.3.4 Proprietà ammortizzanti (cushioning properties)

Nella sua forma finita un materiale di confezionamento dovrebbe consentire una giusta protezione nei confronti di urti, vibrazioni e, più in generale, di sollecitazioni di tipo dinamico; in altre parole, dovrebbe innanzi tutto garantire adeguata resistenza a stress statici che possono essere applicati in condizioni e momenti diversi lungo la catena distributiva e, non secondariamente, assorbire energia proveniente da stress dinamici in quantità tale da impedirne il trasferimento all'alimento. Tra le diverse strategie che possono soddisfare tali requisiti vi sono:

- la riduzione delle forze applicate per unità di area attraverso una loro distribuzione sulla superficie più ampia possibile, evitando la concentrazione del carico su una singola parte;
- la distribuzione e il posizionamento del prodotto nelle parti più resistenti della confezione, in modo da concentrare lo stress verso i punti più resistenti (tale soluzione, tuttavia, è poco applicabile per gli alimenti e anch'essa non tiene conto delle fragilità interne);
- la selezione di un materiale ammortizzante che, in seguito a un impatto, si comprime e assorbe una parte dell'energia trasmessa dalla sollecitazione dinamica, producendo un lavoro di deformazione.

Quest'ultima strategia è la più frequentemente seguita ed è quella che dà i migliori risultati. La velocità di un oggetto che cade cresce con un'accelerazione che è pari a quella di gravità ($g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$) ed è massima al momento dell'impatto, quando si annulla molto rapidamente, con una decelerazione (a) tanto maggiore quanto più breve è il tempo per annullare la velocità dell'oggetto. Se l'urto è rigido (la superficie di impatto non si deforma) tutta l'energia cinetica si trasferisce quasi istantaneamente all'oggetto, dove si annulla compiendo un lavoro di deformazione che può danneggiare seriamente l'oggetto stesso. Le conseguenze di un impatto dipendono dunque, oltre che dall'altezza e dalla massa dell'oggetto, dalla rapidità con la quale diminuisce la velocità dell'oggetto che cade e quindi dalla decelerazione che subisce.

Per limitare l'effetto di una sollecitazione dinamica (urto, caduta), l'imballaggio deve potersi deformare per assorbire parte dell'energia cinetica che possiede l'oggetto al momento dell'urto (convertendola in lavoro di deformazione del materiale); ciò corrisponde ad allungare la distanza e il tempo di arresto e quindi a ridurre il valore della decelerazione a .

L'intensità dell'impatto e la fragilità dell'oggetto possono pertanto essere descritti attraverso il rapporto tra la decelerazione al momento dell'urto (a) e l'accelerazione di gravità (g). Questo rapporto è indicato come fattore G , *fattore di fragilità* (G factor)

$$G = a/g \quad (3.21)$$

Il fattore di fragilità si riferisce al massimo shock che una confezione può sopportare senza subire danno. Quanto più fragile è un prodotto, tanto minore è il valore di G : per beni molto delicati G assume valori compresi tra 15 e 25, mentre beni molto resistenti presentano valori anche superiori a 100. Tale grandezza può essere determinata attraverso uno specifico test che prevede l'alloggiamento della confezione sopra una tavola che può muoversi verticalmente, riproducendo diverse altezze di caduta: quando, dopo la caduta, la tavola si ferma, viene misurata la decelerazione che subisce il manufatto e si osserva l'eventuale danno subito. Il test può essere condotto anche in condizioni dinamiche: una piastra di specifiche dimensioni viene fatta cadere ripetutamente da una data altezza sopra uno strato di campione ammortizzante. Il test viene ripetuto utilizzando piastre di peso e spessore diversi, lasciate cadere da altezze differenti. Il massimo shock subito in seguito all'impatto delle piastre viene misurato e rapportato allo stress statico, rappresentato dal rapporto tra la forza peso e l'area sulla quale è stata esercitata la sollecitazione.

La funzionalità di un materiale ammortizzante è legata alla possibilità di aumentare, in seguito alla sua compressione, l'intervallo di tempo necessario per ridurre la velocità e, quindi, la decelerazione (figura 3.16). In questo modo, quanto minore sarà la decelerazione cui è sottoposto un prodotto di massa nota (m), tanto minore sarà la forza di impatto (F) sul prodotto, secondo quanto indicato dall'equazione:

$$F = ma \quad (3.22)$$

Qualsiasi materiale che si deformi sotto applicazione di un carico può agire come protettivo. Attraverso la deformazione, il materiale protettivo attenua il livello di G raggiunto dal prodotto durante l'urto. L'accuratezza della misura di G è fondamentale per realizzare un packaging adeguato. Se si stimasse un valore di G troppo elevato rispetto alla reale fragilità del prodotto, la soluzione di packaging individuata potrebbe non garantire un'adeguata protezione al prodotto, essendo questo più fragile di quanto stimato. Al contrario, se si stimasse un valore di G troppo basso si potrebbe incorrere in casi di *over-packaging*, ovvero soluzioni inutilmente ingombranti e/o costose.

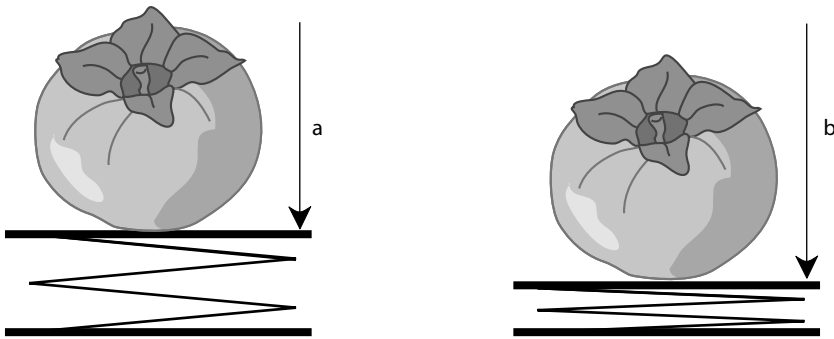


Figura 3.16 Effetto delle proprietà ammortizzanti del packaging. La possibile compressione del materiale aumenta la lunghezza di arresto (da **a** a **b**) riducendo la decelerazione e, quindi, i possibili danni al prodotto.

3.4 Proprietà elettromagnetiche

In questa categoria sono riunite tutte le caratteristiche che descrivono il comportamento di un materiale sottoposto all'irraggiamento con radiazioni elettromagnetiche (luminose o meno). Per radiazione elettromagnetica si intende la simultanea propagazione nello spazio dell'energia associata a campi elettrici e magnetici, variabili nel tempo. Tali radiazioni sono caratterizzate dalle seguenti grandezze fisiche (figura 3.17):

- frequenza f , ossia numero di oscillazioni compiute in un secondo; tale grandezza si misura in cicli al secondo o Hertz (Hz) e relativi multipli e sottomultipli;
- lunghezza d'onda λ , ossia distanza percorsa dall'onda durante un tempo di oscillazione e corrispondente alla distanza tra due massimi o due minimi dell'onda (l'unità di misura è il metro con relativi multipli e sottomultipli).

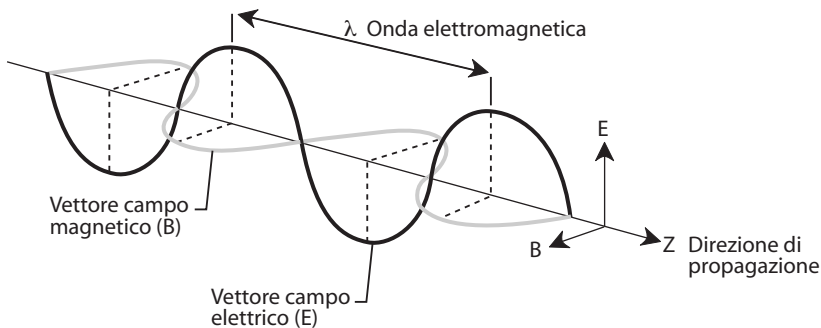


Figura 3.17 Un campo elettromagnetico è caratterizzato dalla presenza contemporanea di un campo elettrico e di un campo magnetico variabili e mutuamente dipendenti; tali campi sono tra loro perpendicolari ed entrambi perpendicolari alla direzione di propagazione.

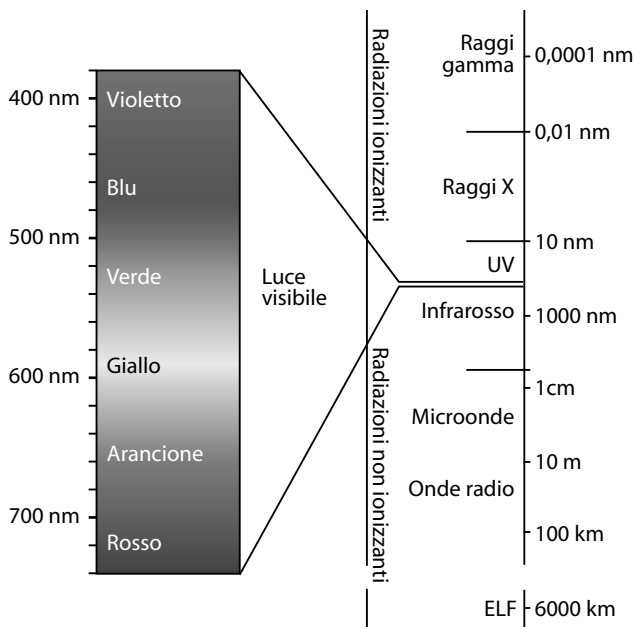


Figura 3.18 Spettro delle radiazioni elettromagnetiche; le diverse classi di onde elettromagnetiche sono ordinate a seconda della loro energia (frequenza).

Le due grandezze sono tra loro legate in maniera inversamente proporzionale attraverso la relazione $f = v/\lambda$, dove v è la velocità di propagazione dell'onda espressa in metri al secondo; ciò significa che quanto minore è la lunghezza d'onda tanto maggiore è la frequenza e quindi l'energia. La velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nel vuoto è di $300\,000\text{ km s}^{-1}$. Quando la propagazione avviene in un mezzo diverso dal vuoto, la velocità di propagazione c dipende dalle proprietà del mezzo attraversato. Oltre a essere legate tra loro, frequenza e lunghezza d'onda sono correlate all'energia E trasportata dall'onda, che si misura in Joule (J). L'energia associata alla radiazione elettromagnetica (nota anche come energia fotonica) è direttamente proporzionale alla frequenza dell'onda stessa attraverso la relazione $E = hf$, dove h è la costante di Planck pari a $6,626 \times 10^{-34}\text{ J s}$. Sebbene, per il Sistema Internazionale (SI) l'unità di misura dell'energia fotonica sia il Joule, spesso l'unità di misura utilizzata è quella convenzionale dell'elettronvolt (eV), definita come l'energia acquistata da un elettrone quando attraversa una differenza di potenziale di 1 Volt. Maggiore è la frequenza (e quindi minore è la lunghezza d'onda), maggiore è l'energia trasportata dall'onda.

Le frequenze delle onde elettromagnetiche possono coprire un vastissimo intervallo di valori, definito spettro elettromagnetico (figura 3.18). Per semplificare i riferimenti e la terminologia, l'intero spettro è stato suddiviso in regioni che assumono denominazioni diverse in base alla frequenza e/o alla lunghezza d'onda, all'energia associata e all'utilizzo.

Le radiazioni elettromagnetiche sono suddivise in due gruppi principali.

Radiazioni ionizzanti, che comprendono raggi X, raggi gamma e una parte dei raggi ultravioletti. Si tratta di radiazioni in grado di determinare la ionizzazione degli atomi e delle molecole del mezzo attraversato; sono, quindi, le più pericolose dal punto di vista biologico.

Tabella 3.12 Principali meccanismi di interazione tra radiazioni elettromagnetiche e materia

Radiazione	Energia (eV)	Meccanismi di interazione con la materia
Raggi γ	$>10^5$	Riarrangiamenti nucleari
Raggi X	10^2-10^5	Transizioni tra i livelli energetici di core (interni)
Raggi UV	$3-10^2$	Transizioni tra i livelli elettronici di valenza
Visibile	2-3	Transizioni tra i livelli elettronici di valenza
Infrarosso	0,01-2	Vibrazione molecolare
Microonde	$10^{-6}-0,01$	Rotazione molecolare e torsione
Onde radio	$<10^{-6}$	Transizione di spin nucleari ed elettronici

Tabella 3.13 Spettro di radiazioni elettromagnetiche di interesse per i materiali di packaging

Radiazione	Frequenza (Hz)	Lunghezza d'onda (nm)	Possibili applicazioni
Raggi γ	$10^{21}-10^{18}$	$10^{-4}-0,1$	Sterilizzazione di materiali
Raggi X	$10^{19}-10^{16}$	0,01-10	Misurazioni di spessori
Raggi UV	$10^{16}-10^{15}$	10-400	Protezione per gli alimenti
Visibile	10^{15}	400-800	Colore, trasparenza dei materiali
Infrarosso	$10^{15}-10^{12}$	800-20.000	Identificazione chimica
Microonde	$10^{11}-10^{10}$	10^4-10^5	Riscaldamento
Onde radio	$<3 \times 10^9$	$>10^7$	Codici a barre, sistemi di identificazione

Radiazioni non ionizzanti (NIR, *non ionizing radiation*), la cui energia non è sufficiente per indurre nella materia il fenomeno della ionizzazione; per queste radiazioni l'assorbimento può solo provocare una cessione di energia di tipo termico. In questa categoria rientrano:

- campi elettromagnetici a frequenze estremamente basse (ELF);
- radiofrequenze (RF);
- microonde (MW);
- infrarosso (IR);
- luce visibile;
- ultravioletti (UV).

La soglia tra radiazioni ionizzanti e non ionizzanti è rappresentata dall'energia fotonica necessaria per ionizzare l'atomo di idrogeno, che è pari a 12 eV. Tutte le radiazioni possono interagire con la materia attraverso meccanismi diversi a seconda del tipo di radiazione, della sua energia e delle caratteristiche del materiale attraversato. Ne segue una diversa capacità di penetrazione nei vari tipi di materiale, ma anche una diversa capacità di assorbimento o di emissione dell'energia secondo specifiche caratteristiche. La tabella 3.12 riporta i principali meccanismi di interazione tra le radiazioni elettromagnetiche dello spettro e la materia.

Lo spettro delle radiazioni elettromagnetiche che può interessare i materiali di packaging è molto ampio, potendo variare dalle lunghezze d'onda delle radiazioni ionizzanti a quelle delle onde radio, come riportato in tabella 3.13.

Lo studio e la valutazione delle interazioni tra radiazioni elettromagnetiche e materia, con specifico riferimento ai materiali di packaging, sono condotti per accertarne la natura, quindi per identificarli con esattezza, oppure per descrivere in modo oggettivo e misurabile una

loro caratteristica estetica, come trasparenza, lucentezza o colore. Più raramente, anche se in modo molto efficace, le proprietà elettromagnetiche sono utilizzate per scopi funzionali: per esempio, per valutare l'omogeneità e l'entità di un rivestimento (per esempio la metallizzazione), per misurare accuratamente lo spessore o per modificare in modo controllato la struttura molecolare di un polimero.

3.4.1 Interazioni tra radiazioni elettromagnetiche e materia

Quando interagisce con la materia, la radiazione può essere sia riflessa dalla superficie sia rifratta attraverso la superficie stessa e, una volta nel materiale, può essere assorbita, trasmessa o diffusa. Nella figura 3.19 è riportato uno schema dei diversi fenomeni che avvengono nel mezzo e all'interfaccia. A seconda dei casi – cioè a seconda del tipo di materiale che si considera e delle lunghezze d'onda coinvolte – i diversi fenomeni, che avvengono sempre tutti contemporaneamente, avranno di volta in volta un effetto dominante.

Brevemente verranno descritte le principali modalità di interazione tra una radiazione elettromagnetica e la materia. Riflessione, dispersione, trasmissione e assorbimento sono concetti che si applicano a tutte le radiazioni elettromagnetiche, indipendentemente dal fatto che si tratti di radiazioni luminose (quindi nella regione del visibile), di radiazioni ionizzanti, di microonde ecc. Si tratta di informazioni basilari per meglio comprendere le proprietà elettromagnetiche dei materiali di packaging.

3.4.1.1 Riflessione

Esistono tre diversi tipi di riflessione: speculare, mista e diffusa (figura 3.20). Nella riflessione speculare a ogni raggio incidente che colpisce la superficie corrisponde un solo raggio riflesso. Se chiamiamo angolo di incidenza θ_i l'angolo formato dal raggio e dalla normale alla superficie e angolo di riflessione θ_r quello formato dalla normale e dal raggio riflesso, la legge della riflessione speculare stabilisce che:

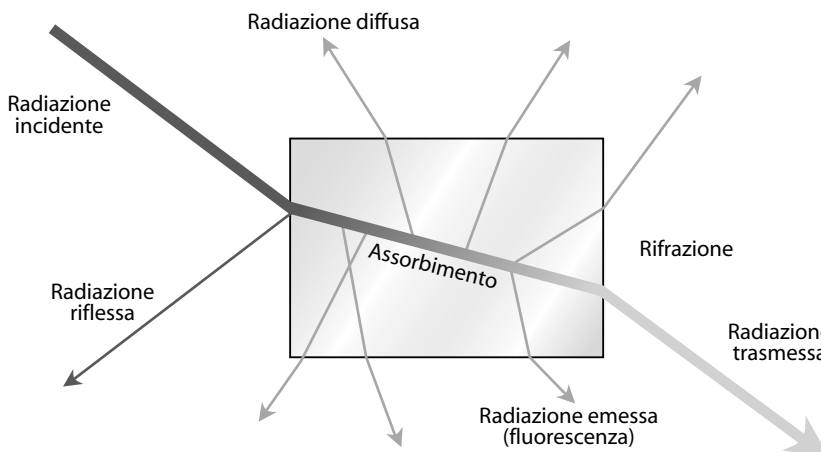


Figura 3.19 Rappresentazione schematica dei diversi fenomeni di interazione tra la radiazione elettromagnetica e la materia nel mezzo e all'interfaccia.

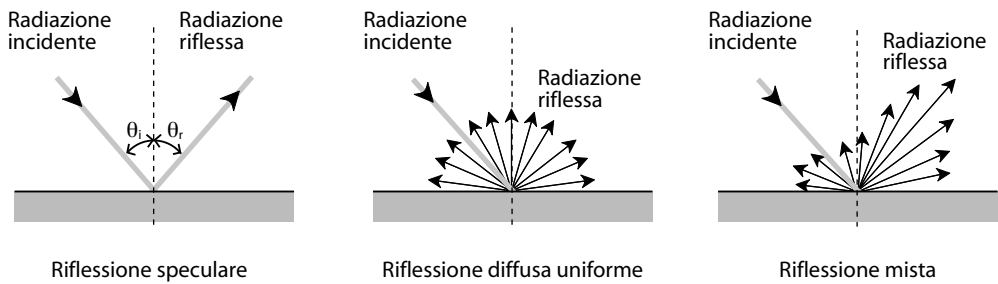


Figura 3.20 Tipologie di riflessione.

- l'angolo di riflessione è uguale all'angolo di incidenza;
- raggio riflesso, raggio incidente e normale stanno nello stesso piano.

Nella riflessione diffusa ogni raggio incidente viene spezzato e riflesso in tutte le direzioni con una distribuzione uniforme, indipendentemente dalla direzione del raggio incidente. La radiazione diffusa si ottiene con superfici opache.

La riflessione mista si manifesta invece quando sono presenti contemporaneamente una componente di riflessione speculare e una di riflessione diffusa. Il raggio incidente viene spezzato in tutte le direzioni, ma con una distribuzione dipendente dalla direzione del raggio incidente. In funzione della superficie del materiale, è possibile ottenere una maggiore rilevanza della componente riflessa o di quella diffusa.

3.4.1.2 Rifrazione

Il fenomeno della rifrazione consiste nella deviazione subita da un raggio di luce quando attraversa due mezzi trasparenti di diversa densità. Nel passaggio da un mezzo trasparente a un altro la radiazione cambia generalmente direzione: tale cambiamento è funzione dell'indice di rifrazione (n) dei mezzi considerati e dell'angolo d'incidenza (θ_1) tra la radiazione incidente e la perpendicolare (normale) alla superficie di separazione dei mezzi attraversati dalla radiazione stessa (figura 3.21). L'angolo tra la normale e il raggio, dopo che questo ha

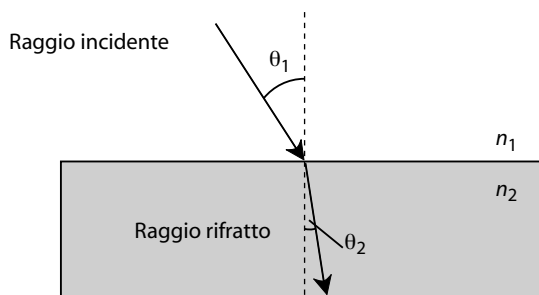


Figura 3.21 Fenomeno della rifrazione.

oltrepastato la superficie di separazione, è detto angolo di rifrazione (θ_2). L'indice di rifrazione assoluto (n) di un materiale rappresenta il fattore di riduzione della velocità di propagazione di una radiazione elettromagnetica quando attraversa un materiale rispetto alla sua velocità nel vuoto e può essere espresso dalla seguente relazione:

$$n = v_1/v_2 = \text{sen}\theta_1/\text{sen}\theta_2 \quad (3.23)$$

Qualora il riferimento non fosse il vuoto ma un altro materiale si parla di indice di rifrazione relativo ($n_{1,2}$). Se il secondo mezzo è più rifrangente del primo, l'angolo di incidenza risulterà maggiore dell'angolo di rifrazione; viceversa, se il secondo mezzo è meno rifrangente del primo, l'angolo di incidenza sarà minore dell'angolo di rifrazione.

3.4.1.3 Dispersione

Si tratta di un fenomeno che avviene al passaggio della radiazione tra due mezzi trasparenti e con diversa densità, dovuto al fatto che l'indice di rifrazione dipende dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente. Quindi, a parità d'angolo d'incidenza e di sostanza rifrangente, raggi di lunghezza d'onda diversa vengono deviati secondo angoli diversi.

Tipicamente i materiali hanno un indice di rifrazione più elevato per le lunghezze d'onda maggiori, così, per esempio, la luce blu diffonde maggiormente rispetto a quella rossa. Quando un fascio di luce bianca passa attraverso le facce non parallele di un prisma si scinde nelle sue componenti spettrali, dando luogo al fenomeno della dispersione (figura 3.22). Per effetto della dispersione, un raggio di luce bianca, per esempio la luce solare che incide su una goccia d'acqua o su un pezzo di vetro, ne esce vivamente colorato e, raccolto su uno schermo bianco, forma una macchia luminosa in cui i colori si susseguono nello stesso ordine che si osserva nell'arcobaleno.

3.4.1.4 Assorbimento

L'assorbimento è il fenomeno che riguarda l'acquisizione, da parte della materia, dell'energia di radiazioni elettromagnetiche. Quando una radiazione attraversa un materiale la sua intensità diminuisce e tale diminuzione è tanto più rilevante quanto più spesso è lo strato di materiale attraversato. L'assorbimento avviene in tempi brevissimi ed è seguito da una rapi-

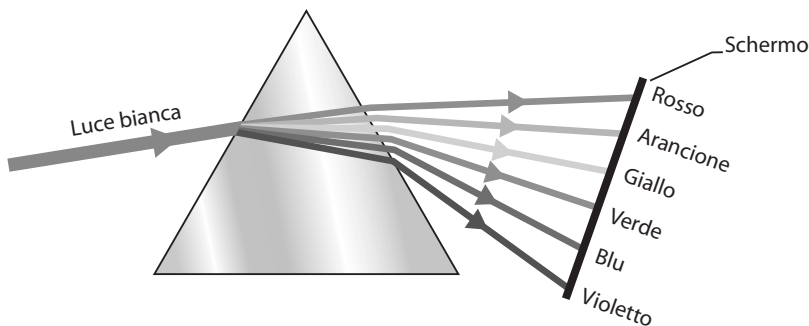


Figura 3.22 Fenomeno della dispersione.

da ri-emissione e/o trasformazione dell'energia assorbita in altra forma di energia (calore, energia chimica). Tale assorbimento è funzione non solo della natura della materia, ma anche della radiazione e in particolare della sua lunghezza d'onda. A seconda della radiazione assorbita si possono avere fenomeni diversi all'interno della molecola (tabella 3.12).

Nel campo del visibile l'assorbimento è associato al colore di un oggetto. Infatti, se un materiale esposto alla radiazione visibile assorbe tutta l'onda luminosa incidente apparirà nero, mentre se assorbe solo determinate lunghezze d'onda, apparirà dello stesso colore della radiazione che riflette.

Inoltre, l'assorbimento nelle regioni UV, visibile e infrarossa da parte di diverse sostanze è sfruttato per conoscere la concentrazione di queste ultime attraverso la legge di Lambert-Beer, che mette in relazione il parametro *assorbanza* (A) con la concentrazione della sostanza assorbente secondo la funzione:

$$A = \epsilon l c \quad (3.24)$$

dove A è l'assorbanza della sostanza, l è la lunghezza del cammino ottico (cm), cioè la lunghezza del percorso compiuto dalla radiazione nella soluzione contenente la sostanza assorbente, ϵ è il coefficiente di estinzione molare ($\text{cm}^{-1} \text{M}^{-1}$), vale a dire l'assorbanza fornita, per una data lunghezza d'onda, da una soluzione a concentrazione molare lungo un cammino ottico di 1 cm. La Legge di Lambert-Beer è dunque di fondamentale importanza per l'analisi quantitativa, poiché evidenzia una dipendenza lineare dell'assorbanza dalla concentrazione del campione.

3.4.1.5 Trasmissione

Quando la radiazione elettromagnetica passa attraverso un oggetto si parla di trasmissione. L'assorbimento, la riflessione, la rifrazione e la diffusione influenzano la trasmissione della radiazione. Come per la riflessione, si può parlare di trasmissione diffusa uniforme, di trasmissione speculare e di trasmissione mista, nota anche come trasmissione diffusa (figura 3.23). Sia la riflessione (vedi par. 3.4.1.1) sia la trasmissione mista sono importanti interazioni tra la radiazione elettromagnetica e la materia che interessano tutti i materiali di packaging caratterizzati da superfici ruvide ed eterogenee. Le irregolarità di tali superfici (non sempre attribuibili a difetti ma, più frequentemente, proprie del materiale) favoriscono la riflessione (se

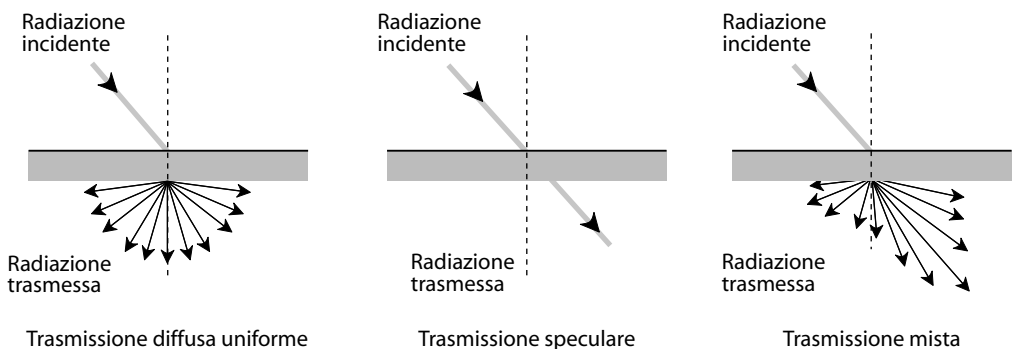


Figura 3.23 Fenomeno della trasmissione.

il materiale non è trasparente) e/o la trasmissione della radiazione elettromagnetica in tutte le direzioni, dando origine al cosiddetto fenomeno di diffusione o scattering. Questo fenomeno dipende dalla differenza tra gli indici di rifrazione dei due mezzi e dalla dimensione e dalla forma delle particelle che compongono il materiale rispetto alla lunghezza d'onda della radiazione incidente.

Il fenomeno dell'assorbimento di una specifica radiazione, descritto dalla legge di Lambert-Beer, consente di conoscere le proprietà di trasmissione di un campione (solido o liquido) sfruttando tecniche spettrometriche basate sul principio di assorbimento (spettrofotometria UV-visibile; spettroscopia nel medio e vicino infrarosso). Tali tecniche prevedono l'impiego, nella loro forma più semplice, di una sorgente di radiazioni, di un monocromatore e di un rivelatore.

Quando una radiazione (monocromatica, cioè caratterizzata da una sola lunghezza d'onda) di intensità I_0 attraversa uno strato di spessore l di un mezzo, una parte viene assorbita dal mezzo stesso e una parte viene trasmessa con intensità residua I (figura 3.24). Il rapporto tra l'intensità della radiazione incidente e quella della radiazione trasmessa è espresso dalla seguente relazione:

$$I = I_0 \exp(-\epsilon c l) \quad (3.25)$$

Il rapporto I/I_0 è designato con il nome di *trasmissione* (T) ed esprime quale frazione della radiazione incidente ha attraversato il campione senza esserne stata assorbita. Questo rapporto – che può assumere valori compresi tra 0 e 1 – è tanto più piccolo quanto maggiore è l'assorbimento.

L'equazione 3.26 mette pertanto in relazione la radiazione assorbita e quella trasmessa:

$$T = I/I_0 = \exp(-A) \quad (3.26)$$

e, passando ai logaritmi decimali:

$$A = \log (1/T) \quad (3.27)$$

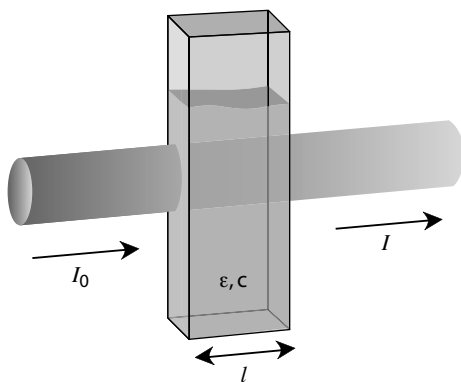


Figura 3.24 Esempio relativo al fenomeno dell'assorbimento e della trasmissione di una radiazione monocromatica attraverso un campione liquido contenuto in una cuvetta.

3.4.2 Proprietà elettromagnetiche dei materiali di packaging nelle regioni dell'ultravioletto e del visibile

Il campo del visibile, definito anche luce, rappresenta una piccola parte dello spettro elettromagnetico compresa tra la regione ultravioletta e quella infrarossa, ovvero tra 380 e 780 nm circa (figura 3.17). Ciò che distingue questa parte dello spettro dalle altre è che la radiazione è assorbita dai fotorecettori umani, producendo una sensazione visiva. Variando la lunghezza d'onda delle radiazioni luminose i raggi appaiono di colore differente. I limiti dello spettro visibile all'occhio umano non sono uguali per tutte le persone, ma variano soggettivamente e possono raggiungere i 730 nm, avvicinandosi agli infrarossi, e i 380 nm avvicinandosi agli ultravioletti. La presenza contemporanea di raggi di tutte le lunghezze d'onda visibili forma la luce bianca.

Gli effetti negativi della luce e delle radiazioni UV sui materiali di confezionamento e sui prodotti confezionati sono, certamente, molto meno conosciuti, meno studiati e meno controllati di quelli che derivano dall'umidità, dall'ossigeno, dalle sollecitazioni meccaniche e da qualsiasi altro potenziale rischio per la qualità di alimenti e imballaggi. In realtà, anche se forse con meno rapidità e gravità, sia la luce visibile sia quella che non percepiamo possono influenzare assai negativamente importanti aspetti estetici e funzionali dei prodotti e, quindi, determinare effetti che hanno anche una specifica valenza economica.

È dunque fondamentale disporre di metodi validi per la determinazione delle proprietà elettromagnetiche dei materiali che interessano queste specifiche porzioni dello spettro ma, allo stesso tempo, diventa più che opportuno avere maggiore consapevolezza degli effetti delle luci visibili e UV che possono interessare i prodotti e le loro confezioni, indagando con attenzione le possibili soluzioni utili per evitare ogni possibile conseguenza negativa di illuminamenti che non possano essere evitati.

3.4.2.1 Indice di rifrazione

Come già descritto, quando una radiazione passa da un mezzo trasparente a un altro la sua velocità e la sua direzione cambiano (figura 3.21).

La legge della rifrazione di Snell mette in relazione l'angolo d'incidenza (θ_1), l'angolo di rifrazione (θ_2) e gli indici di rifrazione assoluti dei mezzi (n_1, n_2):

$$\text{sen}(\theta_1)/\text{sen}(\theta_2) = n_1/n_2 = n_{1,2} \quad (3.28)$$

dove $n_{1,2}$ è l'indice di rifrazione relativo tra i due mezzi. Poiché l'aria ha un indice di rifrazione assoluto quasi uguale a 1, si può ritenere con buona approssimazione che gli indici di rifrazione relativi delle varie sostanze rispetto all'aria siano praticamente uguali ai loro indici assoluti. Essendo funzione della lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica e della natura del materiale attraversato, la sua misura in condizioni controllate può essere impiegata per identificare i materiali trasparenti.

L'indice di rifrazione viene misurato, secondo norme codificate, con appositi strumenti e a temperatura costante, utilizzando una sorgente monocromatica o una lampada a incandescenza. Si misura quindi il seno dell'angolo incidente del raggio luminoso e quello dell'angolo di rifrazione del raggio trasmesso dal provino. La tabella 3.14 riporta, a titolo d'esempio, i valori di indice di rifrazione di alcuni materiali, determinati a 20 °C con radiazione monocromatica gialla (589,3 nm) di una lampada al sodio (nD). La conoscenza dell'indice di rifrazione è impiegata nel settore del food packaging in particolari circostanze, per esempio

Tabella 3.14 Indice di rifrazione di alcune sostanze (valori indicativi)

Materiale	nD	Materiale	nD
Poliestere	1,64	Polimetilmetacrilato	1,49
Vetro	1,50-1,90	Acqua	1,33
Polistirene	1,59	Aria	1,00
Poliammide	1,57	Polipropilene	1,50

per la caratterizzazione di pigmenti o per la valutazione oggettiva della nitidezza della visione attraverso il materiale. Alcuni ingredienti sono usati in modo specifico nella fabbricazione di vetri per incrementarne l'indice di rifrazione e aumentarne quindi la nitidezza. Infatti, quanto più un materiale è rifrangente, tanto più il raggio trasmesso si avvicina alla normale, migliorando la visione. I materiali plastici che meglio simulano il vetro sono i policarbonati e i poliesteri, che presentano i valori più elevati di indice di rifrazione.

3.4.2.2 Trasparenza

Rappresenta una caratteristica fondamentale – in quanto molto apprezzata – dei materiali destinati al confezionamento alimentare; è tipicamente una proprietà estetica, poiché è riferita alla trasmissione della luce visibile, quella percepita dall'occhio umano. Può essere valutata oggettivamente usando una sorgente luminosa standard e valutando il rapporto tra l'intensità della luce trasmessa e quella della luce incidente. In pratica, adottando procedure di valutazione standardizzate, corrisponde alla trasmittanza speculare (nella stessa direzione del raggio incidente, con una deviazione inferiore a $0,1^\circ$) di una radiazione luminosa compresa tra 540 e 560 nm (figura 3.25).

La trasparenza di un materiale è inversamente proporzionale allo spessore secondo la legge di Lambert-Beer ed è generalmente espressa come trasmittanza percentuale ($T\%$). La trasparenza è influenzata dal grado di cristallizzazione, dall'omogeneità, dalla quantità di alcuni ingredienti come pigmenti e molecole inorganiche, dalla presenza di sottili strati di rivestimento (coating) come vernici o metallizzazioni. Di conseguenza, tale proprietà estetica, può essere modificata per ottenere un'adeguata protezione degli alimenti sensibili alla luce.

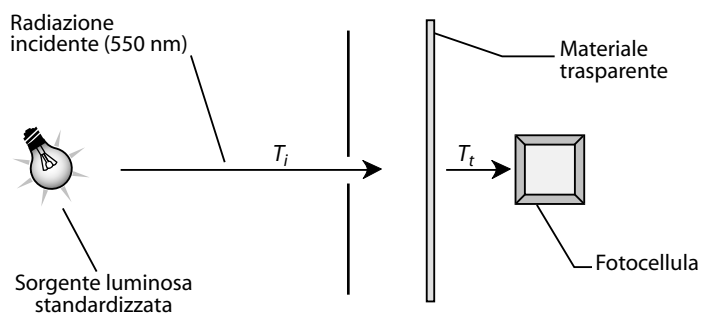


Figura 3.25 Misura della trasparenza di un materiale. T_i : intensità incidente; T_t : intensità trasmessa; Trasparenza = $(T_t/T_i) \times 100$.

Tabella 3.15 Valori di trasparenza di alcuni materiali di confezionamento

Materiale	%T (trasmittanza speculare a 550 nm)
Vetro (180 µm)	92,1
Polipropilene bi-orientato (28 µm)	92,0
Cellophane (20 µm)	92,0
Poliammide bi-orientata (nylon 6.6) (18 µm)	89,2
Polivinilcloruro (40 µm)	87,3
Poliammide (Nylon 6.6) cast (50 µm)	82,6
Polipropilene cast (40 µm)	82,3
Poliestere (25 µm)	81,8
Polistirene (38 µm)	43,5
Politetrafluoroetilene (50 µm)	21,4
Pergamina (45 µm)	8,7
Polipropilene bianco (36 µm)	3,1
Pergamina vegetale (78 µm)	1,3

Un'altra grandezza ampiamente utilizzata per la caratterizzazione della trasparenza dei materiali di confezionamento è l'assorbanza del materiale, definita anche densità ottica (DO) ed espressa dalla seguente relazione (equivalente alla 3.27):

$$DO = \log (1/T) \quad (3.29)$$

La tabella 3.15 riporta i valori di trasparenza di alcuni materiali di confezionamento ricavati dai valori sperimentali di trasmittanza speculare raccolti a 550 nm. Nella scelta di un materiale che servirà al confezionamento di un alimento fotosensibile è però bene considerare non solo la componente speculare che viene trasmessa dal materiale ma anche la componente diffusa ed eventualmente quella riflessa dall'alimento o dalle pareti interne del contenitore stesso. Ciascuna componente, infatti, può contribuire in misura maggiore o minore al deterioramento degli alimenti esposti a radiazioni luminose nel corso della loro conservazione.

3.4.2.3 Opacità o haze

Anche questa è una caratteristica principalmente estetica dei materiali trasparenti, ma la sua determinazione può essere impiegata per valutazioni di tipo funzionale – poiché le operazioni di finitura, come la stampa o altri trattamenti di superficie, possono modificare tale indice oggettivo – e per caratterizzare materiali non trasparenti come carte e cartoni.

Per i materiali trasparenti l'opacità può essere definita come la percentuale di luce trasmessa che, attraversando il materiale, devia dal raggio incidente per fenomeni di diffusione (scattering) e rifrazione di un angolo superiore a $2,5^\circ$. Per la sua determinazione vi sono procedure standardizzate e appositi dispositivi ottici, che fanno uso di una sorgente luminosa in grado di emettere radiazioni nella regione del visibile e di una sfera integratrice, un dispositivo in grado di raccogliere tutta la luce trasmessa e diffusa (figura 3.26). Una fenditura sulla sfera (F) controlla il passaggio della luce che devia di non oltre $2,5^\circ$ dalla direzione della luce incidente. Con la fenditura chiusa, il detector (D) misura la radiazione trasmessa totale (T_t).

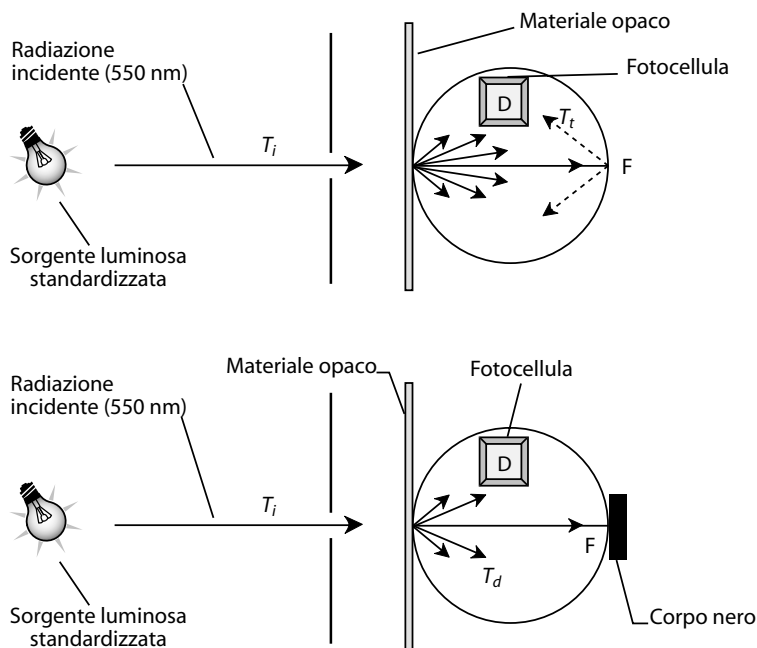


Figura 3.26 Dispositivo ottico per determinare l'opacità dei materiali.

Tabella 3.16 Valori di opacità di alcuni film plastici utilizzati per il confezionamento

Materiale	Opacità (%)
Vetro	0-0,2
Polistirene	0,1-3,0
Polietilene a bassa densità (50 μm)	30
Polipropilene (25 μm)	2,50
Polietilene ad alta densità (30 μm)	5-6
Policarbonato	0,5-2,0
Cellophane	3,0
Poliestere (15-30 μm)	2,5-5,0

Quando, invece, la fenditura F è aperta e in sua corrispondenza è posizionato un “corpo nero” in grado di assorbire la luce non deviata, il detector misura la luce che viene diffusa con un angolo $>2,5^\circ$ (T_d). Il valore percentuale di opacità può essere quindi espresso come:

$$\text{Haze (\%)} = (T_d/T_t) \times 100 \quad (3.30)$$

dove T_d rappresenta l'intensità della luce diffusa, raccolta in presenza del “corpo nero”, e T_t è l'intensità totale della luce trasmessa attraverso il provino in assenza del “corpo nero”.

Nella tabella 3.16 sono riportati i valori di opacità di alcuni film plastici utilizzati per il confezionamento degli alimenti.

3.4.2.4 Brillantezza (lucentezza) o gloss

È una misura della capacità di una superficie di riflettere specularmente la luce incidente; come in uno specchio, l'angolo di incidenza è pari a quello di riflessione. La brillantezza viene valutata secondo norme standardizzate, mediante un apposito dispositivo ottico che invia un raggio luminoso con un determinato angolo incidente (che può essere di 20, 45, 60 o 85°) e registra l'intensità della luce riflessa con la stessa angolazione; il dispositivo viene preventivamente tarato utilizzando due superfici a brillantezza diversa e nota; la misura è espressa in valore percentuale o millesimale (figura 3.27).

In riferimento alle normative standard (ASTM, ISO, DIN, TAPPI ecc.), gli strumenti per la misura della brillantezza vengono realizzati con geometrie di misura differenti per soddisfare le specifiche esigenze dei singoli settori industriali. Per geometria di misura s'intende l'inclinazione sia dell'angolo d'incidenza della sorgente luminosa sia dell'angolo d'osservazione del detector, che devono essere speculari.

Questa proprietà è particolarmente impiegata per valutare le superfici metallizzate, staminate e tutte quelle di cui si vogliono rappresentare oggettivamente le caratteristiche di lucentezza ed è utilizzata soprattutto per le materie plastiche.

Il range di misura viene espresso in unità GU (gloss units) ed è compreso tra 0 e 100 GU, corrispondenti rispettivamente a una superficie molto opaca e a una molto lucida; per super-

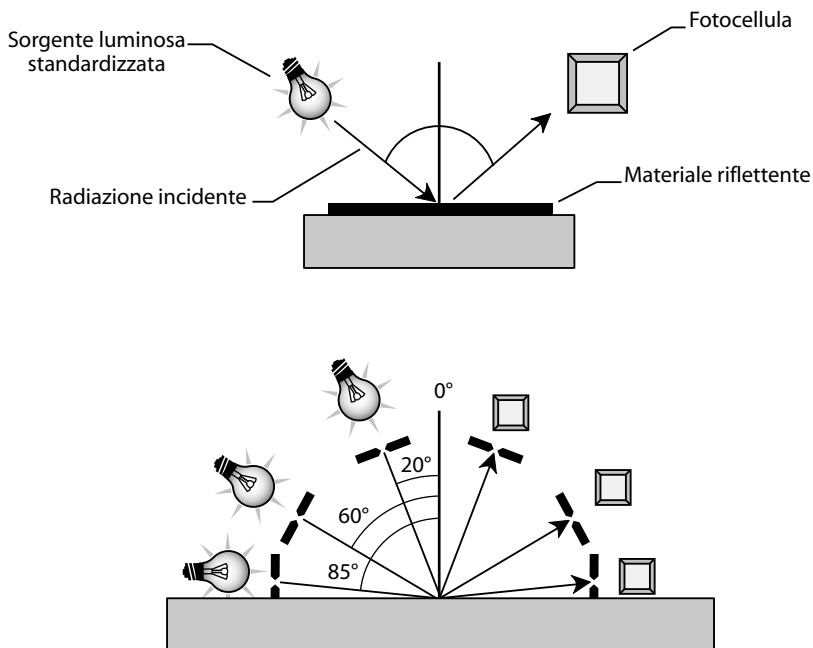


Figura 3.27 Misura della lucentezza (*gloss*). L'angolo incidente è uguale a quello rilevato per la riflessione.

Tabella 3.17 Brillantezza di alcuni materiali plastici

Materiale	Brillantezza (GU)
Polivinilcloruro rigido (20°, 20-50 µm)	120-160
Cloruro di polivinilidene (45°, 60 µm)	113
Polipropilene	80
Polipropilene perlato	70
Ionomeri (20°)	25

fici metalliche a specchio, il range si estende fino a 1999 GU. La tabella 3.17 riporta valori di GU per alcuni materiali.

3.4.2.5 Spettri di assorbimento o trasmissione nelle regioni UV e visibile

Le tecniche spettroscopiche utilizzano l'interazione delle radiazioni elettromagnetiche con la materia per ottenere informazioni sugli atomi e sulle molecole costituenti un campione della materia in esame. La spettroscopia si basa sul fatto che le molecole interagiscono con le radiazioni di diversa lunghezza d'onda, originando spettri in regioni diverse. Lo spettro viene rappresentato con un grafico, che riporta l'energia emessa o assorbita in funzione della lunghezza d'onda o di un altro parametro elettromagnetico (massa, momento, frequenza ecc.). La strumentazione richiesta per gli studi spettroscopici è diversa per ogni regione dello spettro elettromagnetico considerata.

Come già accennato, l'assorbimento di radiazioni elettromagnetiche di lunghezze d'onda caratteristiche della regione del visibile (380-750 nm circa) e dell'ultravioletto (<380 nm) determina transizioni tra stati elettronici diversi (dallo stato elettronico fondamentale ai diversi stati elettronici eccitati). In queste regioni dello spettro per misurare la quantità di radiazione assorbita a ciascuna lunghezza d'onda si usano gli spettrofotometri. Nello spettrofotometro una radiazione monocromatica attraversa una cella trasparente contenente il campione da analizzare; nel caso, invece, di materiali solidi (come film plastici o campioni in vetro) il raggio attraversa lo stesso campione alloggiato nell'apposita postazione; negli strumenti a doppio raggio, un raggio di riferimento attraversa una cella identica alla precedente, ma non contenente il composto in esame, confrontando continuamente l'intensità dei due raggi in uscita su tutte le lunghezze d'onda. Se il composto o il materiale assorbe la radiazione di una certa lunghezza d'onda, l'intensità del raggio campione I_S sarà minore di quella del raggio di riferimento I_R . Lo strumento registra tale differenza a tutte le lunghezze d'onda e traccia un grafico detto spettro di assorbimento. Questo spettro descrive in modo ottimale il comportamento di un solido trasparente sottoposto a irraggiamento.

Lo spettro di trasmissione/assorbimento nel campo delle radiazioni visibili (380-780 nm) consente di caratterizzare oggettivamente il colore di un oggetto (figura 3.28) e, come si è detto, di valutare la visibilità attraverso un materiale trasparente. L'analisi spettrofotometrica nel visibile può essere utilmente condotta anche su corpi non trasparenti; registrando infatti lo spettro in riflettanza è possibile ricavare le informazioni necessarie per caratterizzare oggettivamente il colore di un materiale anche opaco e porre così sotto controllo le operazioni di stampa, etichettatura e decoro di un imballaggio.

Rispetto alle radiazioni della regione del visibile, le radiazioni UV sono caratterizzate da basse lunghezze d'onda ed elevata frequenza e sono dotate di elevata energia. Gli assorbi-

menti che i materiali mostrano alle diverse lunghezze d'onda in tale regione sono dovuti a salti elettronici da un orbitale a un altro a maggiore energia: le informazioni che si ottengono con questi metodi di indagine possono quindi essere molto utili per identificare e caratterizzare la struttura atomica di un materiale. Le radiazioni tipiche della regione UV sono di norma le più critiche per il loro elevato contenuto energetico (in grado di rompere molti le-

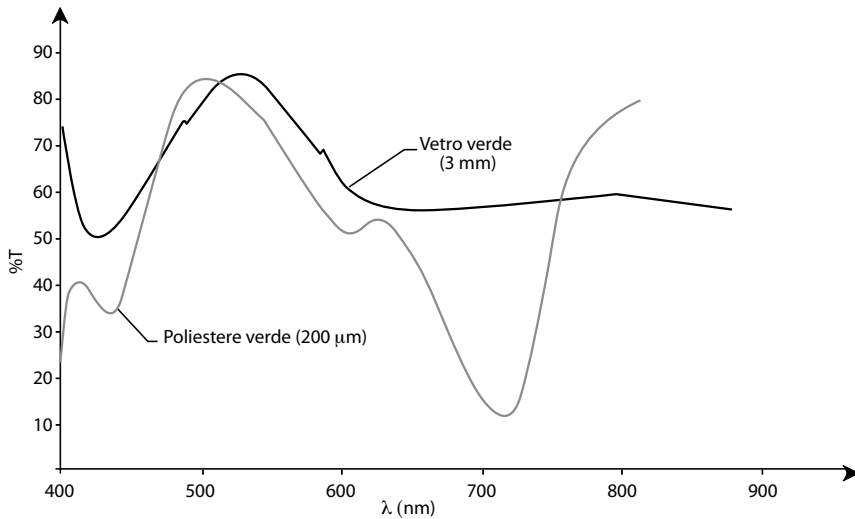


Figura 3.28 Spettri di trasmissione nella regione visibile di vetro e plastica di colore analogo (i valori riportati sono indicativi).

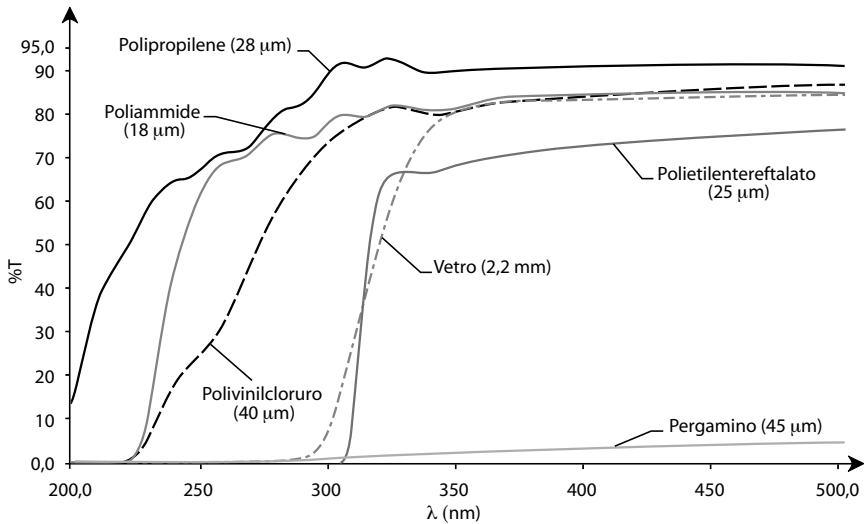


Figura 3.29 Spettri di trasmissione nella regione UV-visibile di alcuni materiali di imballaggio (i valori riportati sono indicativi).

gami chimici) e sono pertanto potenzialmente pericolose sia per gli alimenti sia per i materiali di confezionamento.

Negli alimenti le radiazioni UV possono attivare meccanismi di degradazione a carico di sostanze sensibili, come grassi, pigmenti e vitamine; nei materiali plastici e cellulósici possono provocare alterazioni di colore e brillantezza, perdita di flessibilità e degradazione con produzione di sostanze volatili e non. Nella formulazione di materiali plastici e di vetro sono oggi impiegati numerosi additivi in grado di ridurre la trasmissione di radiazioni UV.

Nel loro insieme, gli spettri UV/VIS forniscono informazioni utili per:

- valutare la capacità di un materiale di mascherare radiazioni potenzialmente pericolose per l'alimento confezionato (oltre alle ultraviolette, talvolta anche le radiazioni visibili possono essere dannose per la qualità dell'alimento confezionato);
- rappresentare quali-quantitativamente la trasparenza di un materiale;
- identificare oggettivamente un materiale, poiché gli spettri di trasmissione sono in genere in grado di discriminare i differenti materiali anche quando presentano identico colore (come è evidente dalla figura 3.28).

3.4.2.6 Spettri di assorbimento o trasmissione nella regione dell'infrarosso

La regione infrarossa dello spettro elettromagnetico comprende radiazioni di lunghezza d'onda compresa tra 780 e 40-50000 nm; per la sua grande estensione le lunghezze d'onda sono misurate spesso in μm e i diversi punti dello spettro sono indicati anche in numeri d'onda, che corrispondono al reciproco delle lunghezze d'onda (cm^{-1}). Per le differenti informazioni che può fornire, viene comunemente divisa in tre campi spettrali: *vicino infrarosso*

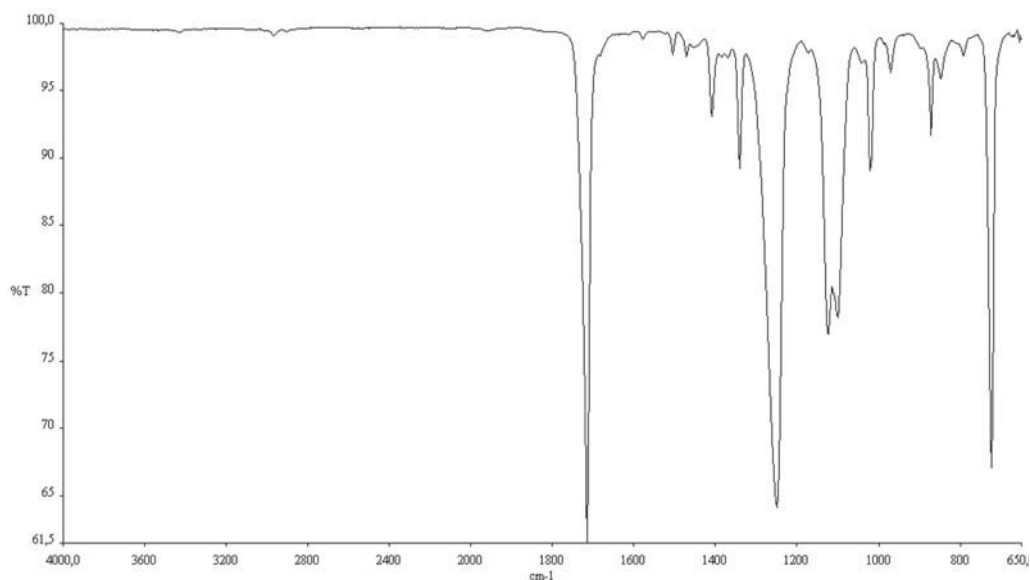


Figura 3.30 Spettro di trasmissione IR di un polipropilene orientato (OPP).

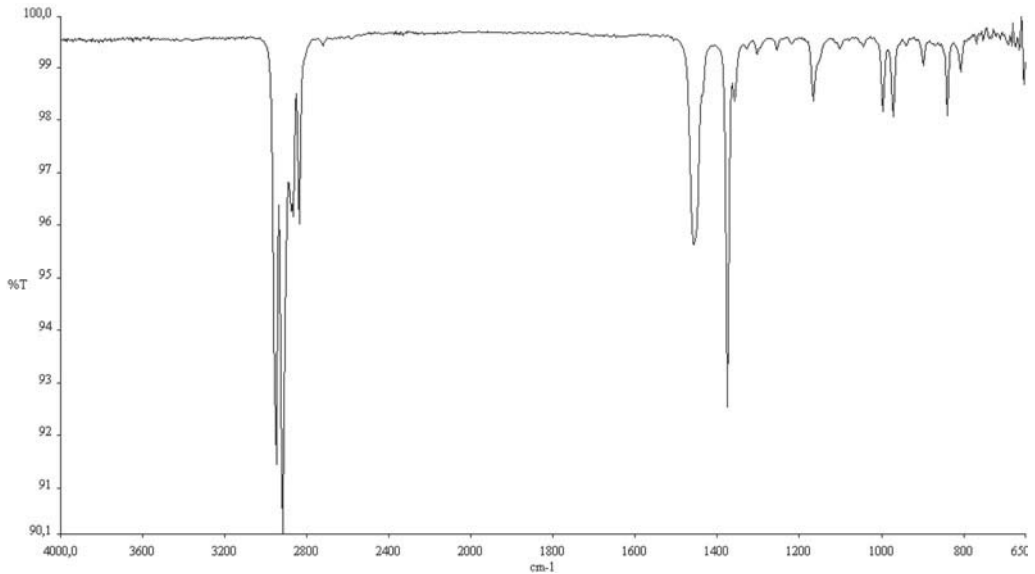


Figura 3.31 Spettro di trasmissione IR di un polietilentereftalato (PET).

(780-3000 nm), i cui assorbimenti sono dovuti a fenomeni analoghi a quelli che caratterizzano la regione visibile; *medio infrarosso* (3000-25000), in cui gli assorbimenti sono dovuti principalmente ai livelli vibrazionali fondamentali delle molecole; *lontano infrarosso* (25000-50000 nm), caratterizzato dalla corrispondenza con i livelli rotazionali. In definitiva, lo studio di uno spettro IR (condotto prevalentemente nella regione del medio infrarosso) permette di acquisire informazioni utili per descrivere la struttura molecolare di un materiale e, nello specifico, di identificare con certezza qualsiasi materia plastica, in quanto i polimeri presentano definiti e intensi assorbimenti in questa regione dello spettro elettromagnetico. Nelle figure 3.30 e 3.31 sono riportati gli spettri di trasmissione IR di un polipropilene orientato (OPP) e di un polietilentereftalato (PET) e le bande di assorbimento caratteristiche che consentono l'identificazione del polimero. Per i criteri di interpretazione spettrale si rimanda a testi specializzati.

3.4.3 Comportamento di un materiale sottoposto a radiazione ionizzante

Le radiazioni ionizzanti sono radiazioni dotate di energia sufficiente a ionizzare gli atomi o le molecole con le quali entrano in contatto, ossia a produrre cariche positive e negative. Con il termine ionizzazione si intende quindi la separazione di un elettrone dall'atomo a cui appartiene. Convenzionalmente si considerano ionizzanti le radiazioni con frequenza maggiore di 3×10^{15} Hertz ma la capacità di una radiazione di poter ionizzare un atomo, o di penetrare più o meno in profondità all'interno della materia, dipende oltre che dalla sua energia anche dal tipo di radiazione e dal materiale con il quale avviene l'interazione. In alcuni casi questo processo può innescare la rottura dei legami fra atomi che sono normalmente legati nella stessa molecola.

Le radiazioni ionizzanti si dividono in due categorie principali, a seconda che la ionizzazione del mezzo irradiato avvenga per via diretta o indiretta: *radiazioni direttamente ionizzanti* e *radiazioni indirettamente ionizzanti*. Le prime sono particelle cariche (elettroni, particelle beta, particelle alfa ecc.), mentre le seconde sono i cosiddetti fotoni (raggi X e raggi gamma), i neutroni eccetera.

Nel settore del packaging alimentare le radiazioni ionizzanti possono essere utilizzate per scopi diversi che vanno dalla decontaminazione o sterilizzazione dei materiali, alla modificazione della loro struttura molecolare per migliorarne le prestazioni, alla valutazione di alcune specifiche caratteristiche sfruttando proprio la capacità penetrante di questa porzione dello spettro elettromagnetico. Come si dirà più avanti nel testo (cap. 13), alcune radiazioni ionizzanti possono essere impiegate, con ovvie restrizioni di tipo legislativo, nella sterilizzazione non convenzionale di alimenti preconfezionati.

Tra le radiazioni direttamente ionizzanti, i fasci di elettroni accelerati (noti anche come *electron beam*) sono ampiamente utilizzati per applicazioni diverse. Le più comuni comprendono la modifica di proprietà termiche e meccaniche di polimeri attraverso meccanismi di reticolazione (*cross-linking*) o il trattamento di inchiostri e di rivestimenti usati nelle applicazioni di stampa. La tecnica dell'*electron beam* può anche essere impiegata nella deposizione e funzionalizzazione di *coating*, ossia di ridottissimi strati di materiale polimerico di diversa natura che conferiscono particolari proprietà al substrato su cui sono depositi, oppure per imprimere su carta e cartoncino disegni decorativi in rilievo (goffratura). Il fascio di elettroni viene generato per effetto termoionico da filamenti in tungsteno riscaldati a temperature molto alte (superiori a 2000 °C) e accelerato da un campo elettrico ad alto voltaggio in una camera sotto vuoto. In tali condizioni il fascio di elettroni viene focalizzato verso il materiale da trattare che si trova in camere di lavorazione opportunamente isolate dall'esterno. A differenza di altre radiazioni, il fascio di elettroni accelerato ha minor potere di penetrazione nei corpi, ma la sua capacità penetrante aumenta all'aumentare dell'energia. Gli effetti che si ottengono sui materiali trattati sono svariati e dipendono da parametri critici quali l'energia del fascio (legata alla capacità di penetrazione del materiale), la dose impartita (cioè l'energia assorbita per unità di massa) e il tasso di dose (la velocità alla quale la dose viene conferita).

Tra le radiazioni non direttamente ionizzanti, quelle impiegate, seppur con diverse limitazioni, nel settore del packaging sono le radiazioni γ , prodotte dal decadimento di nuclei radioattivi emessi dal cesio 137 o dal cobalto 60, e le radiazioni X, ottenute da lamine metalliche investite da elettroni accelerati.

A bassi dosaggi (5/10/15 kGy) i raggi γ possono sterilizzare prodotti o materie prime particolarmente "puliti" a monte del trattamento, oppure sanificare un prodotto al quale, per gli scopi di igiene applicativi finali, non è richiesta sterilità ma solamente l'eliminazione di muffe e funghi (per esempio sanitizzazione di tappi per bevande, vaschette ecc.). A medi dosaggi (20/25/30 kGy) i raggi γ sono in grado di sterilizzare materiali di confezionamento destinati non solo al comparto alimentare, ma anche a quello cosmetico e farmaceutico; a elevati dosaggi (100 kGy e oltre) vengono impiegati per la modifica della struttura molecolare di alcuni polimeri (vedi anche cap. 8). A tale proposito, l'effetto dell'irraggiamento con radiazioni ionizzanti su una macromolecola – non solo di sintesi, come i polimeri plastici, ma anche naturale come gli amidi, gli acidi nucleici e le proteine – può essere quello di determinare una frammentazione (evento che peggiora le proprietà meccaniche e aumenta il rischio di migrazione, con possibile contaminazione dell'alimento), oppure una reticolazione, che si traduce in una maggiore densità e in migliori prestazioni meccaniche e diffusionali (minore tendenza alla cessione di frammenti di materiale all'alimento, minore permeabilità grazie a una maggio-

Tabella 3.18 Comportamento di alcuni materiali sottoposti a irraggiamento con radiazioni ionizzanti

Materiale	Comportamento
Polietilene	Prevale la reticolazione
Polistirene	Idem
Poliestere	Idem
Etilenvinil acetato	Idem
Tetrafluoroetilene	Idem
Cellulosa	Prevale la degradazione
Polivinilcloruro	Comportamento misto
Esteri della cellulosa	Idem
Policarbonato	Idem
Poliammide	Idem
Polipropilene	Idem

re compattezza del materiale). Con la reticolazione si può migliorare la performance del materiale grazie a un controllo della struttura chimica, favorendo una riduzione dello spessore e della massa del materiale impiegato e riducendo, quindi, anche l'impatto ambientale. La tabella 3.18 riassume i comportamenti tipici di alcuni materiali di interesse per il settore del confezionamento. In alcuni Paesi è consentito l'irraggiamento di prodotti alimentari pre-confezionati. In questo caso il materiale deve possedere particolari caratteristiche di resistenza. In tabella 3.19 sono riportate le dosi massime consigliate per alcuni materiali di confezionamento, al fine di evitare fenomeni di frammentazione e reticolazione dei costituenti.

I raggi X (10^{19} - 10^{16} Hz) sono radiazioni ad alta frequenza e alta energia che presentano lunghezze d'onda dello stesso ordine di grandezza delle distanze tra gli atomi nei solidi. Come i raggi γ sono radiazioni penetranti e non esistono corpi in grado di assorbirle totalmente quando attraversati. Per tale caratteristica vengono impiegati in ambiti medici (radio-

Tabella 3.19 Dosi massime di radiazioni ionizzanti per alcuni materiali di confezionamento

Materiale	Dose massima (kGy)
Cellophane patinato con nitrocellulosa	10
Carte glassine	10
Cartoncini patinati	10
Carta Kraft	0,5
Film in polietilentereftalato	10
Film in polistirene	10
Film in cloruro di polivinilidene e copolimeri	10
Nylon 11 (Poliammide-11)	10
Copolimeri etilenvinil acetato	30
Pergamena vegetale	60
Film in polietilene (polimero di base)	60
Nylon 6 (poliammide-6)	60

grafia, radioscopia ecc.). Nell'ambito dei materiali di packaging i raggi X vengono ampiamente utilizzati in tecniche analitiche che sfruttano la capacità di tali radiazioni di promuovere l'emissione di energia secondaria per fluorescenza da parte di atomi irradiati. L'energia e l'intensità di tale emissione consentono di determinare lo spessore e il rapporto tra i costituenti di un materiale. I raggi X consentono, inoltre, di individuare difetti e contaminanti presenti anche in tracce in materiali diversi come metalli, vetri e ceramiche e anche polimeri plastici ad alta densità. Spesso, nei processi in linea, i raggi X sono utilizzati per verificare il sovra- o il sottoriempimento di un contenitore, il contenuto mancante o danneggiato, difetti del packaging, forme non standard ecc. Infine, i raggi X sono utilizzati con successo nella differenziazione dei rifiuti urbani solidi per la loro capacità di riconoscere diversi tipi di materiali sulla base della loro composizione chimica.

3.4.4 Comportamento di un materiale irraggiato con microonde

Le microonde sono radiazioni elettromagnetiche con lunghezze d'onda comprese tra quelle delle onde radio più corte e quelle dell'infrarosso. Hanno frequenze comprese tra 300 MHz e 30 GHz; trovano largo impiego, in ambito sia domestico sia industriale, per riscaldare, scongelare e, in parte, sanitzare prodotti alimentari anche già confezionati.

Il comportamento dei materiali di packaging irraggiati con queste radiazioni è assai diversificato ed è legato alla loro natura chimica e alla loro organizzazione molecolare. Se il materiale contiene molecole polari o ioni liberi, questi tendono a muoversi e a orientarsi in dipendenza dell'orientazione del campo elettrico della radiazione che li investe e che varia con elevata frequenza (figura 3.32). Questi movimenti danno luogo a urti che portano a dissipazione di energia cinetica con produzione di calore, tipica dei materiali che assorbono le microonde. La tabella 3.20 riporta il comportamento in risposta all'irraggiamento con microonde di alcuni materiali comunemente impiegati nel confezionamento alimentare.

I materiali destinati all'utilizzo in forno a microonde possono essere o meno trasparenti alle microonde, a seconda che fungano semplicemente da supporto agli alimenti o che debbano interagire con le radiazioni per coadiuvare la cottura. I materiali inerti includono vetro, carta e materie plastiche e sono trasparenti alle microonde, quindi non si riscaldano direttamente e consentono l'assorbimento della massima quantità possibile di energia da parte dell'alimento. I materiali più comuni sono il polipropilene (PP), qualora sia richiesta una buona barriera al vapor d'acqua, e il polietilentereftalato cristallino (CPET), poiché avendo pun-

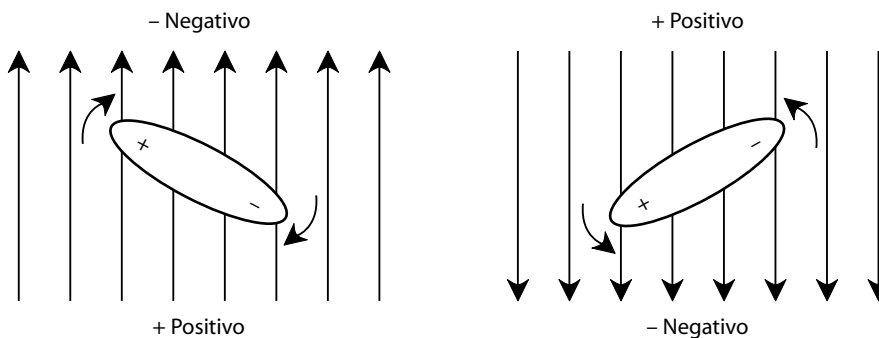


Figura 3.32 Movimento di un dipolo in un campo elettrico.

Tabella 3.20 Comportamento di alcuni materiali irraggiati con microonde

Materiali	Comportamento	Osservazioni
Metalli	Assorbente, riflettente	Rischio di archi elettrici
Vetro	Trasparente	–
Cellulosa	Trasparente, assorbente	Dissipazione di energia
Polietilene	Trasparente	Rischio di fusione
Poliestere	Trasparente	–
Polistirene	Trasparente	–
Poliammide	Trasparente	–

ti di fusione superiori a 210 °C risultano idonei per molti tipi di alimenti. Il CPET presenta il vantaggio aggiuntivo di essere adatto sia per il forno a microonde sia per quello tradizionale. È possibile accoppiare il CPET con il polietilenterefalato amorfo (APET), in particolare per carne, pollame e prodotti ittici; grazie alla sua natura cristallina indotta durante il processo di termoformatura, il CPET apporta stabilità alle alte temperature, l'APET è invece utilizzato soprattutto per la conservazione alle basse temperature e, data la sua trasparenza, consente al consumatore la visione del prodotto prima dell'acquisto.

A partire dagli anni Ottanta, accanto ai materiali tradizionali, sono stati introdotti materiali definiti “susettori” di microonde. Si tratta di dispositivi impiegati per convertire l'energia delle microonde in calore per riscaldare il prodotto. Un materiale suscettore è un composito, generalmente costituito da una matrice polimerica, trasparente alle microonde, nella quale sono inglobati materiali finemente dispersi, che risentono di una o entrambe le componenti elettromagnetiche delle microonde. Quando il materiale viene investito da microonde il componente suscettore inglobato nella matrice polimerica si riscalda, raggiungendo temperature elevate. La parte a contatto con l'alimento gli trasferisce energia termica per conduzione, mentre le altre parti emettono energia in forma di radiazioni infrarosse che raggiungono la superficie dell'alimento e consentono il riscaldamento dell'atmosfera circostante il prodotto.

Esistono due diverse tipologie di materiali suscettori.

- Materiali suscettibili alla componente magnetica delle microonde, o ferromagnetici (ferro, cobalto, ossidi e leghe di questi materiali, ferrite). Se investiti da un'onda elettromagnetica, tali materiali oscillano per effetto del campo magnetico variabile e si riscaldano fino a una determinata temperatura, detta temperatura di Curie, oltre la quale il loro comportamento da ferromagnetico diviene paramagnetico: diventano perciò trasparenti alle microonde. La temperatura di Curie ideale per un materiale suscettore è intorno ai 250 °C. Esempi di utilizzo sono: piatti ceramici con inclusioni di ferriti, leghe nichel-rame incluse in materiali plastici, polveri di ferriti incollate mediante collanti organici a fogli di alluminio.
- Materiali che risentono della componente elettrica del campo magnetico (polveri di carbonio, alluminio in scaglie o in film sottili). In tale caso il riscaldamento avviene per effetto dell'induzione di correnti elettriche nel suscettore che, opponendo elevata resistenza alla circolazione elettrica, si surriscalda. Questa tipologia comprende film plastici contenenti polveri di carbonio o alluminio in scaglie, film plastici metallizzati e poliaccoppiati metallizzati.

Si possono utilizzare contemporaneamente materiali appartenenti alle due diverse categorie, in modo da sfruttare entrambe le componenti delle microonde.

3.5 Densità e proprietà relative

3.5.1 Densità

La densità (ρ) rappresenta la massa dell'unità di volume (massa volumica); le unità di misura più frequentemente impiegate per definirla sono g cm^{-3} o kg m^{-3} (1 g cm^{-3} corrisponde a $10^{-3} \text{ kg m}^{-3}$). La densità può essere considerata una stima della concentrazione della materia e permette di differenziare agevolmente, anche in senso economico, i diversi materiali (tabella 3.21). Per alcuni materiali può rappresentare un parametro di identificazione, come nel caso di materie plastiche molto simili.

Per materiali non omogenei (plastiche espanse, estrusi pellettizzati, sinterizzati ecc.) si è soliti esprimere, al posto della densità, una massa volumica apparente (*bulk density*), definibile come il rapporto tra il volume complessivo (che, di fatto, è pari alla capacità del contenitore) e la massa del materiale.

Tabella 3.21 Densità dei principali materiali di confezionamento

Materiale	Massa volumica (g cm^{-3})
Acciaio	8
Banda stagnata	8
Alluminio	2,7-3,2
Vetro	2,4-2,8
Cellophane	1,5
Polistirene	1,04-1,08
Polipropilene	0,88-0,91
Legno (quercia)	0,60-0,90
Carta	0,75-1,15

3.5.2 Grammatatura

Tra le proprietà derivate dalla densità si può indicare la grammatatura (G), in quanto rapporto tra il peso e la superficie di un materiale piano (assimilabile a un parallelepipedo). La sua unità di misura è g m^{-2} .

Questa grandezza è molto utilizzata per caratterizzare sia i materiali cellulósici sia i materiali plastici, i rivestimenti (coating) e le vernici. La grammatatura è in relazione sia allo spessore del materiale (altezza del parallelepipedo, l) sia alla sua densità ρ (g cm^{-3}): il rapporto tra la grammatatura (G) e la densità (ρ) permette dunque di ricavare il valore dello spessore (l):

$$\frac{G(\text{g m}^{-2})}{\rho(\text{g cm}^{-3})} = l(\mu\text{m}) \quad (3.31)$$

Gli esercizi di autovalutazione di questo capitolo si trovano a pagina 493

Bibliografia

- ASTM Standard D1003-07e1 (2007) Standard Test Method for Haze and Luminous Transmittance of Transparent Plastics. ASTM International, West Conshohocken, PA. DOI: 10.1520/D1003-07.
- ASTM Standard D774/D774M-97 (2007) Standard Test Method for Bursting Strength of Paper. ASTM International, West Conshohocken, PA. DOI: 10.1520/D0774_D0774M-97R07.
- ASTM Standard D1938-08 (2008) Standard Test Method for Tear-Propagation Resistance (Trouser Tear) of Plastic Film and Thin Sheeting by a Single-Tear Method. ASTM International, West Conshohocken, PA. DOI: 10.1520/D1938-08.
- ASTM Standard D2457-08 (2008) Standard Test Method for Specular Gloss of Plastic Films and Solid Plastics. ASTM International, West Conshohocken, PA. DOI: 10.1520/D2457-08.
- ASTM Standard D1004-09 (2009) Standard Test Method for Tear Resistance (Graves Tear) of Plastic Film and Sheeting. ASTM International, West Conshohocken, PA. DOI: 10.1520/D1004-09.
- Autori Vari (1996) The glass transition. In: *The Macrogalleria: A cyberwonderland of polymer fun* (<http://pslc.ws/italian/tg.htm>).
- Bellia L (2008) *Fisica tecnica ambientale (Illuminotecnica)* (<http://www.federica.unina.it/corsi/fisica-tecnica-ambientale-illuminotecnica/>).
- Bosset JO, Gallmann PU, Sieber R (1994) Influence of light transmittance of packaging materials on the shelf life of milk and dairy products – a review. In: Mathlouthi M (ed) *Food Packaging and Preservation*. Blackie Academic & Professional, London.
- Brown WE (1992) *Plastic in Food Packaging*. Marcel Dekker, New York, pp. 247-291.
- Brunelli E (2007) Il plasma e la carta. *Industria della carta*, 8: 24-27.
- Casati D (2006) Introduction to Adhesion Science & Technology. *Atti del Corso Angolo di contatto e adesione, Stazione Sperimentale Carta e Cartoni e Paste per Carta*, SSCCP, 20 ottobre, Milano.
- Cavella S, Masi P (1994) I materiali suscettori per l'impiego in forni a microonde: stato dell'arte e prospettive. In: Piergiovanni L, Fava P (eds) *Imballaggio funzionale per una migliore qualità degli alimenti confezionati*. CNR-RAISA, Sottoprogetto 4, Milano, pp. 43-48.
- Chiantore O (2007) *I polimeri amorfi* (<http://scienzadeimateriali.campusnet.unito.it/didattica/att/acdd.3573.file.pdf>).
- Chibowski E (2007) On some relations between advancing, receding and Young's contact angles. *Adv Colloid Interface Sci*, 133(1): 51-59.
- Ciardelli F (2005) Materiali polimerici. In: *Enciclopedia degli idrocarburi*, pp.741-757 (http://www.treccani.it/export/sites/default/Portale/sito/altre_aree/scienze_della_terra/enciclopedia/italiano_vol_2/739-758ITA3.pdf).
- Decker EL, Frank B, Suo Y, Garoff S (1999) Physics of contact angle measurement. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 156(1-3): 177-189.
- Decker EL, Garoff S (1997) Contact Line Structure and Dynamics on Surfaces with Contact Angle Hysteresis. *Langmuir*, 13(23): 6321-6332.
- Garfagnini A (2004) *Appunti delle lezioni di fisica sui fenomeni di superficie nei liquidi*. Università degli Studi di Padova (http://www.pd.infn.it/~bobisut/tensione_superf.pdf).
- Grodzka J, Pomianowski A (2006) Wettability versus Hydrophilicity. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 40: 5-18.
- Hansen FK (2004) *The Measurement of Surface Energy of Polymers by Means of Contact Angles of Liquids on Solid Surfaces*. Department of Chemistry, University of Oslo.
- Hernandez RJ, Selke SEM, Culter J, Culter JD (2000) *Plastics Packaging: Properties, Processing, Applications, and Regulations*. Hanser Gardner Publications, Cincinnati.
- Kwok DY, Neumann AW (1999) Contact angle measurement and contact angle interpretation. *Adv Colloid Interface Sci*, 81; 3: 167-249.
- Lee DS, Yam KL, Piergiovanni L (2008) *Food Packaging Science and Technology*. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 43-77.

- Licciulli A, Greco A (2009) *Le proprietà meccaniche*. Corso di Scienza e Ingegneria dei Materiali (http://www.antonio.licciulli.unile.it/pdf_2009/proprieta_meccaniche_sim.pdf).
- Moncada Lo Giudice A, de Lieto Vollaro G (2007) *Illuminotecnica*. Casa Editrice Ambrosiana, Milano.
- Nicoli MC (2005) *Appunti del corso di Tecnologie alimentari non convenzionali*. Dipartimento di Scienze degli Alimenti, Università di Udine.
- Palladino P (2002) *Lezioni di illuminotecnica*. Tecniche Nuove, Milano.
- Piergiovanni L, Limbo S (2004) The protective effect of film metallization against oxidative deterioration and discoloration of sensitive foods. *Packag Technol Sci*, 17(3):155-164.
- Pulvirenti A (ed. it. a cura di) (2009) *Microbiologia degli alimenti*. Springer-Verlag Italia, Milano, pp. 405-430.
- Riganakos KA, Koller WD, Ehlermann DAE et al. (1999) Effects of ionizing radiation on properties of monolayer and multilayer flexible food packaging materials. *Radiat Phy Chem*, 54(5): 527-540.
- Robertson GL (1993) *Food Packaging Principles and Practices*. Marcel Dekker, New York, pp. 63-72.
- Rouillard V, Lamb M (2008) On the effects of sampling parameters when surveying distribution vibrations. *Packag Technol Sci*, 21(8): 467-477.
- Ryynänen S (1995) The electromagnetic properties of food materials: A review of the basic principles. *J Food Eng*, 26(4): 409-429.
- Taylor AEF (2000) *Illumination Fundamentals*. Lighting Research Center. Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY (<http://www.opticalres.com/lt/illuminationfund.pdf>).