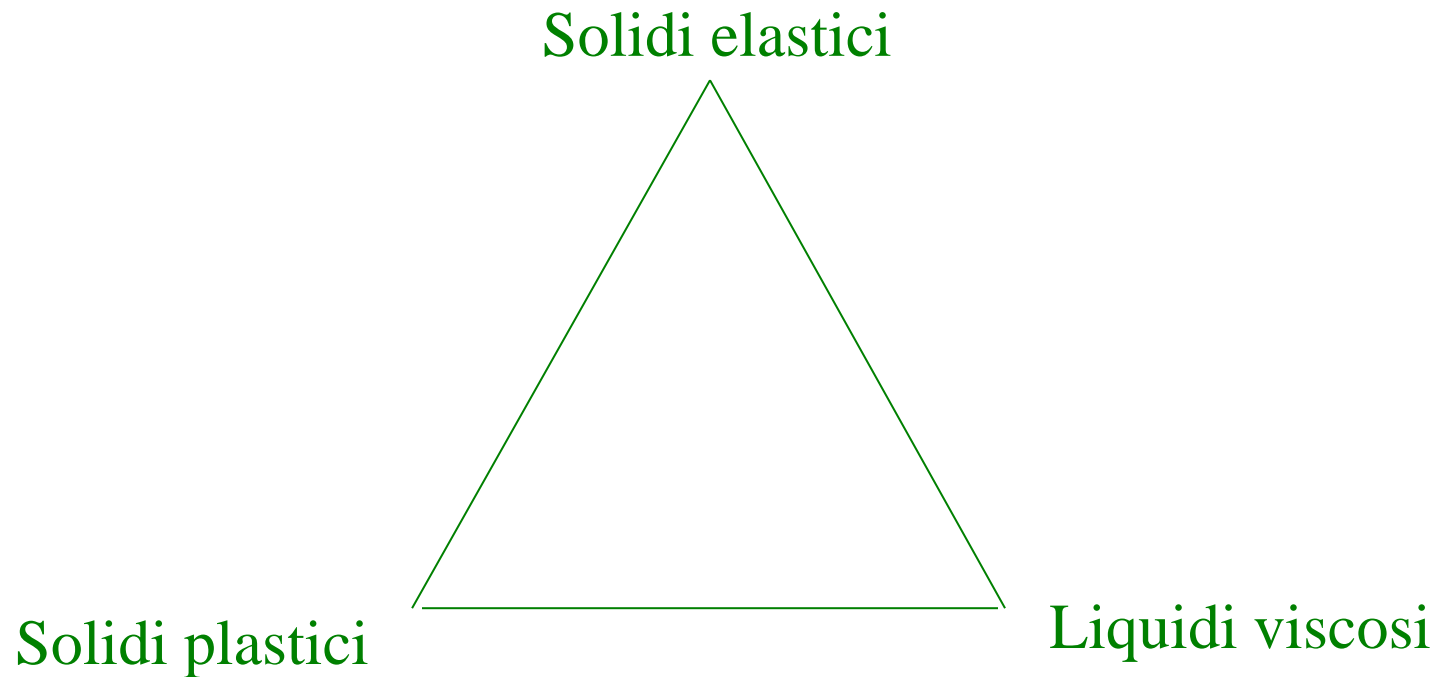


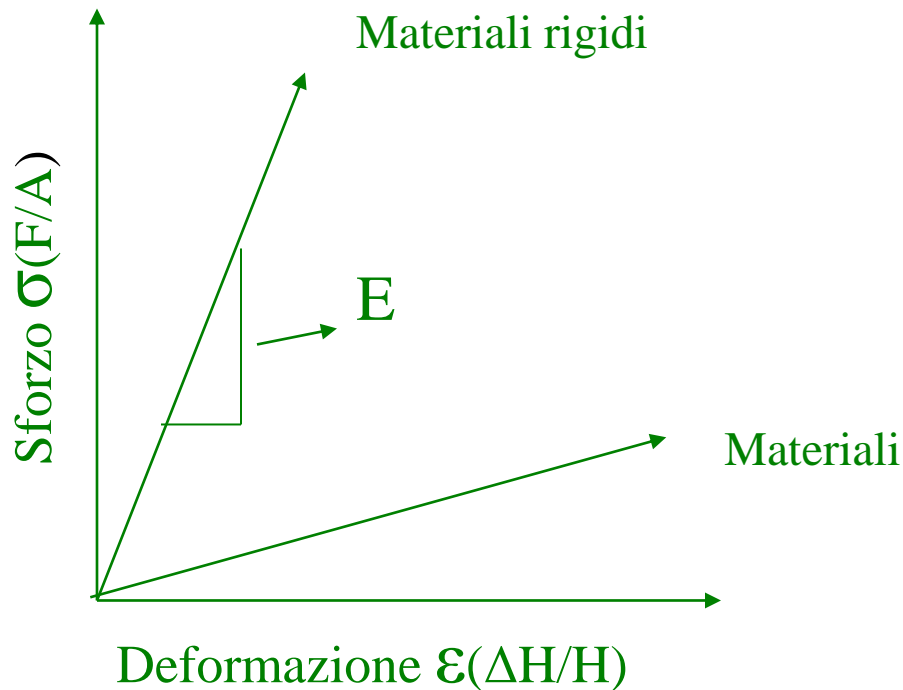
Cenni di scienza dei materiali

- Classificazione della materia in un diagramma ternario:



• Solidi elastici

- Legge di Hooke: esiste una correlazione lineare tra sforzo e deformazione.



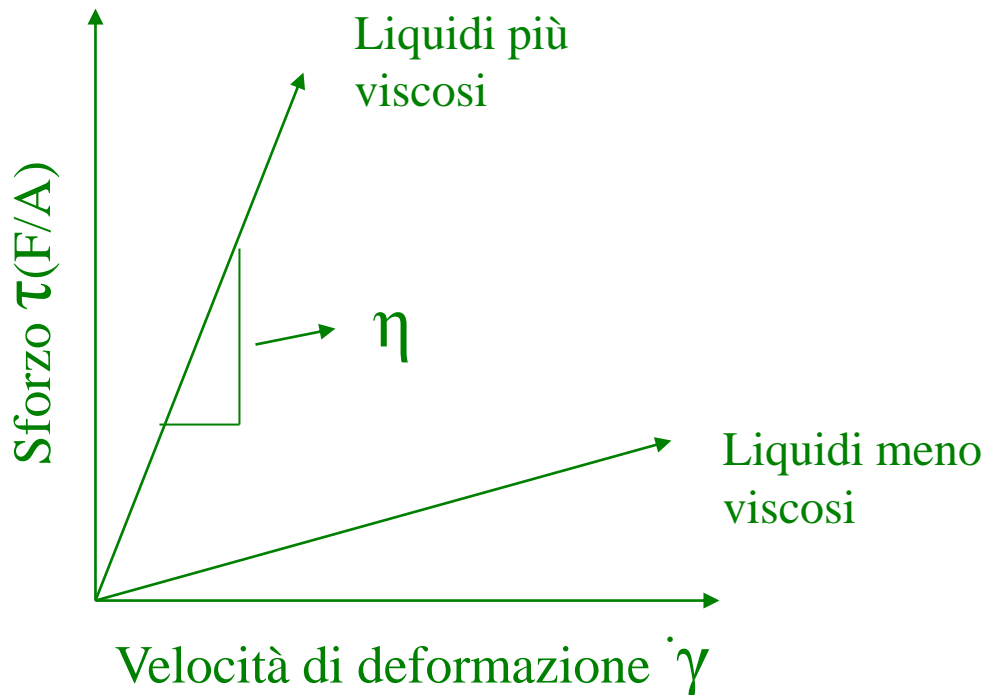
$$\sigma = E \epsilon$$

Modulo elastico

Un corpo elastico è capace di recuperare la deformazione applicata.

• Liquidi viscosi

- Legge di Newton: esiste una correlazione lineare tra sforzo e velocità di deformazione



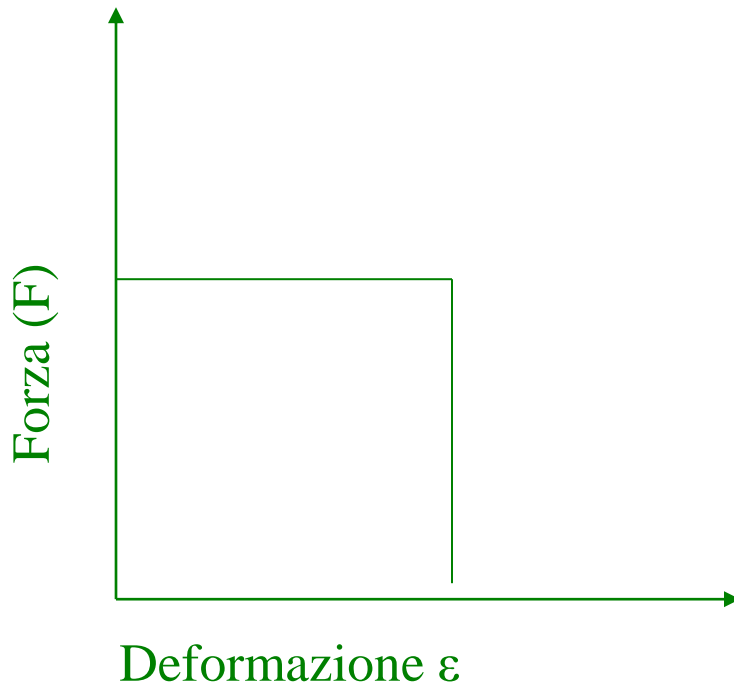
$$\tau = \eta \, dv/dx = \eta \cdot \dot{\gamma}$$

viscosità

Un corpo liquido non è capace di recuperare la deformazione applicata.

• Materiali plastici

- Legge di Herschel-Bulkley: $\sigma = \sigma_0 + k (d\gamma/dt)^n$



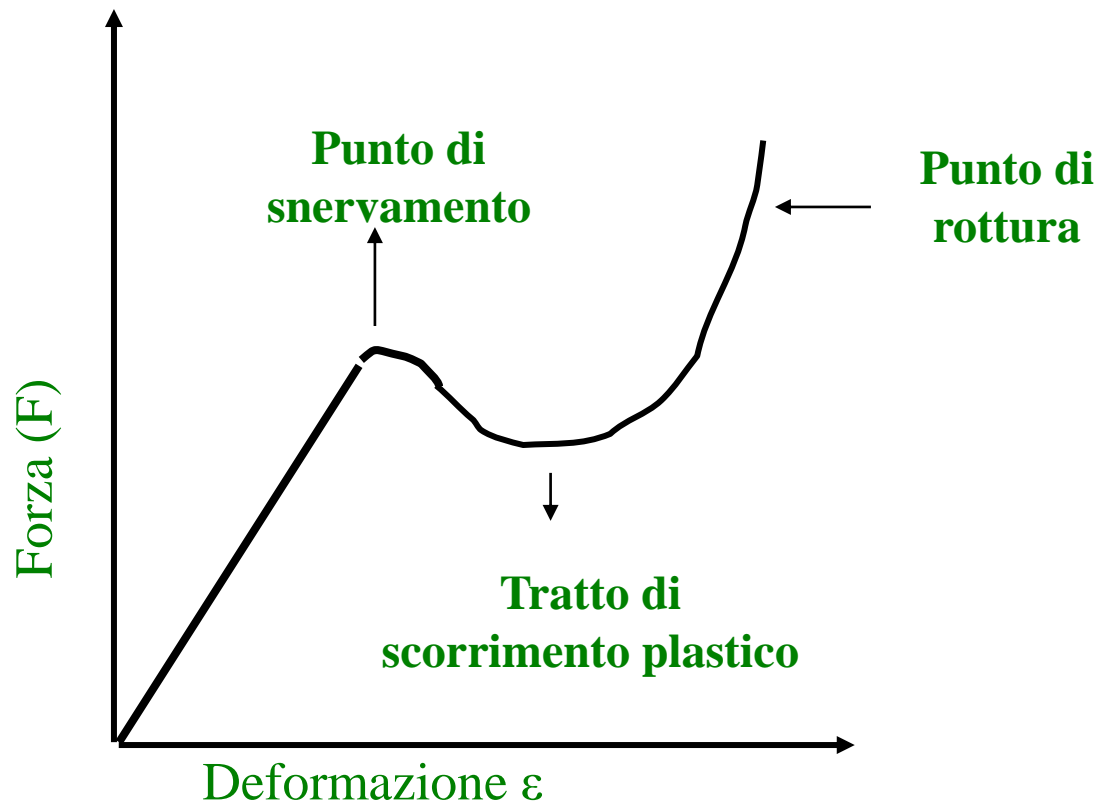
La deformazione è permanente e continua fino a rottura



I materiali plastici non recuperano la deformazione, ma diversamente dai liquidi non continuano a deformarsi

• Materiali di imballaggio: Solidi non ideali

-Ex. Solido elastoplastico



Proprietà meccaniche

Le proprietà meccaniche

Comprendono quelle proprietà fisiche che descrivono il comportamento di un solido sottoposto all'applicazione di una forza, che può essere rappresentata dal suo stesso peso o da una sollecitazione esterna:

- La massa volumica
- Le proprietà di resistenza meccanica
- Il coefficiente di frizione

La massa volumica

Sinonimo di densità, rappresenta il peso dell'unità di volume. Le unità di misura più frequentemente impiegate per definirla sono:

$$\text{g cm}^{-3}$$

$$\text{kg m}^{-3}$$

La massa volumica può essere considerata una stima della concentrazione della materia e permette di differenziare agevolmente, anche in senso economico, i diversi materiali.

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

La massa volumica

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

Le proprietà di resistenza meccanica

L'abilità di una confezione di rimanere integra durante le fasi di distribuzione e vendita dipende:

- dalle proprietà meccaniche del materiale di imballaggio
- dall'efficacia della chiusura dell'imballaggio

Le proprietà di resistenza meccanica

•Le forze statiche:

-sono quelle applicate in modo costante e per tempi discreti

Forze che si esercitano durante l'impilamento sugli scaffali o sui pianali di carico o in seguito ad un avvolgimento in termoretraibile o con altri mezzi di contenimento o, ancora, per effetto della pressione interna come nel caso delle bevande carbonatate.

•Le forze dinamiche:

-sono invece quelle che si esauriscono in breve tempo come in conseguenza di un urto, di una caduta, di una vibrazione.

Le proprietà di resistenza meccanica

In relazione all'origine delle forze queste possono essere distinte in:

- **Forze interne** (pressurizzazione interna)
- **Forze esterne al pack** (impilamento, impatto)

In relazione alla **direzione** di applicazione, le forze che interessano i materiali di imballaggio possono essere classificate come:

- **Forze di trazione**
- **Forze di compressione**

- Test per valutare le proprietà meccaniche:

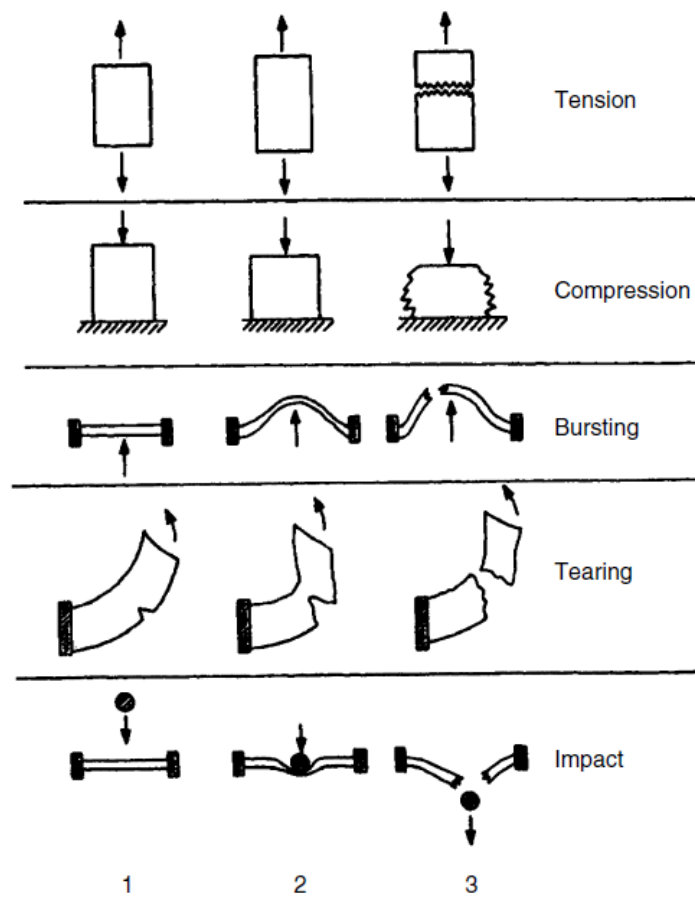


FIGURE 13.20 Tests that assess packaging material strength under tension, compression, bursting, tearing or impact forces. (From Karel, M. and Lund, D.B., 2003a; Copyright 2003 from *Physical Principles of Food Preservation* by Marcus Karel and Daryl B. Lund. Reproduced by permission of Routledge/Taylor & Francis Group, LLC.)

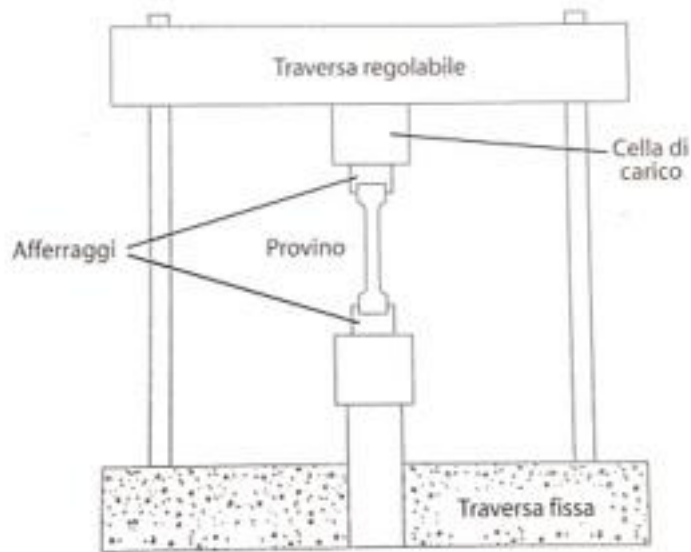
Le proprietà di resistenza alla Trazione

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.

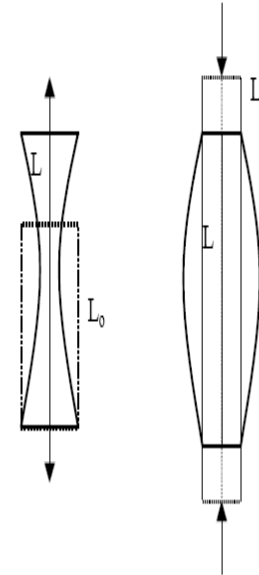
La prova viene solitamente realizzata con uno strumento chiamato dinamometro

Le proprietà di resistenza alla Trazione

$$\text{Stress} = \frac{F}{A}$$

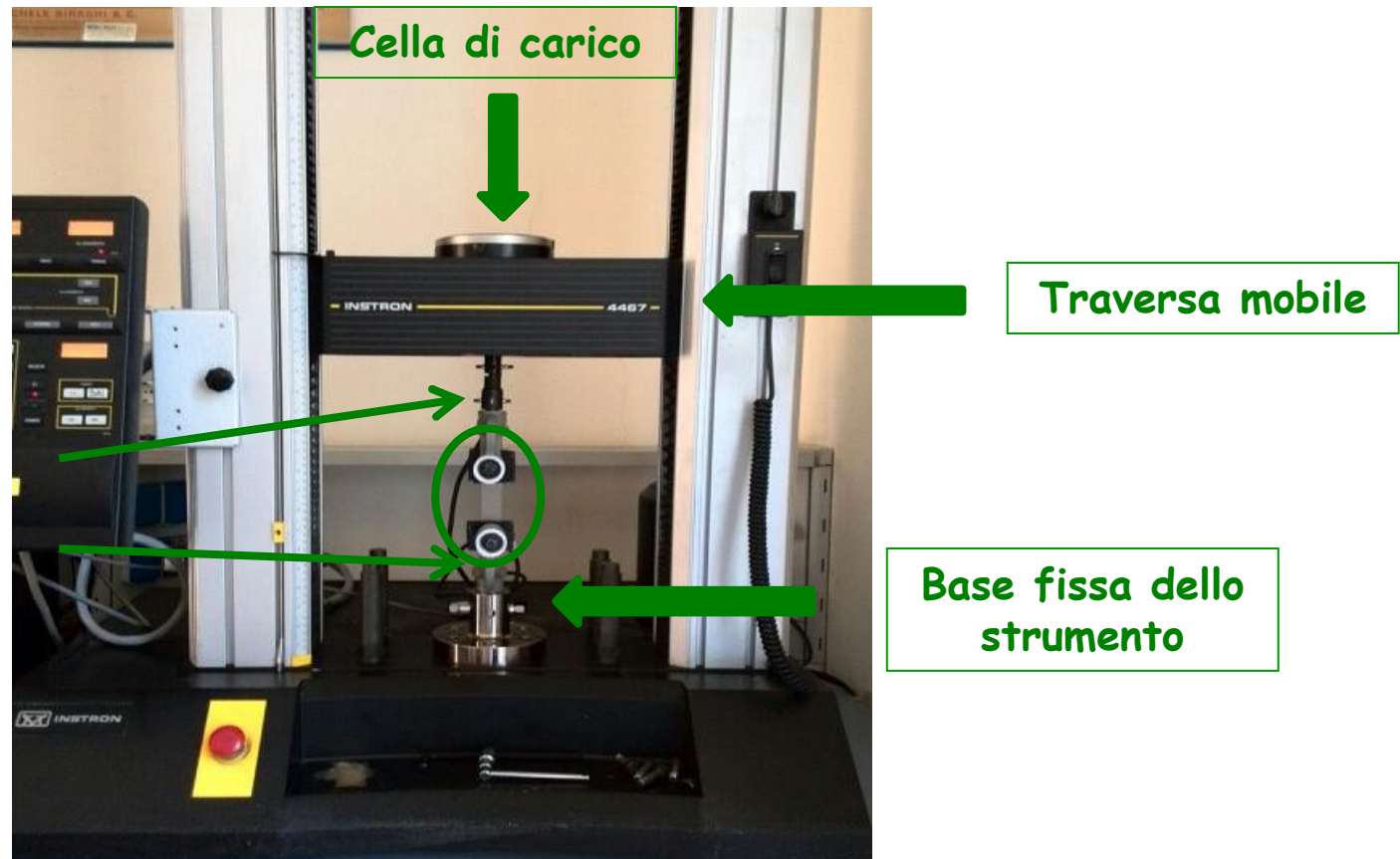


3.7 Prova di trazione mediante dinamometro.



Sollecitazioni tensili (di trazione) e compressive.
 L_0 = dimensione originale; L = dimensione dopo la sollecitazione.
 Deformazione tensile = $100 \times (L - L_0)/L_0$
 Deformazione compressiva = $100 \times (L_0 - L)/L_0$

Test di resistenza alla trazione: dinamometro



Le proprietà di resistenza meccanica

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0}$$

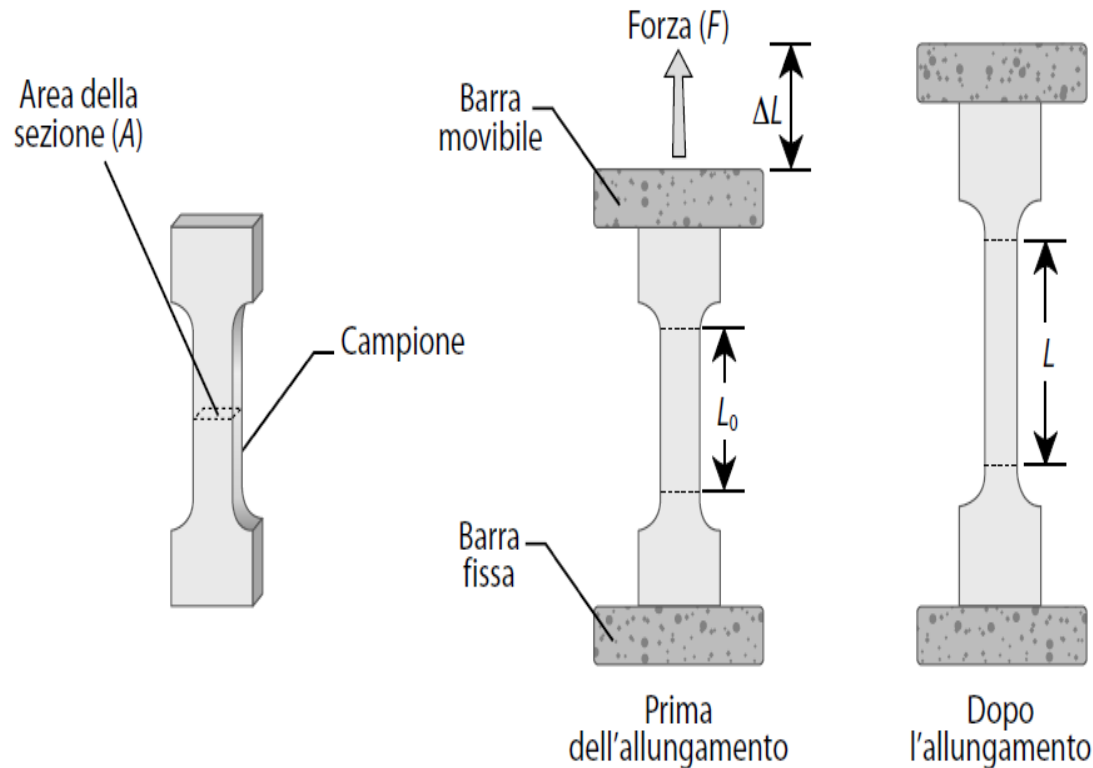


Figura 3.8 Geometria del provino realizzato con il materiale da sottoporre alle prove di trazione.

Le proprietà di resistenza meccanica

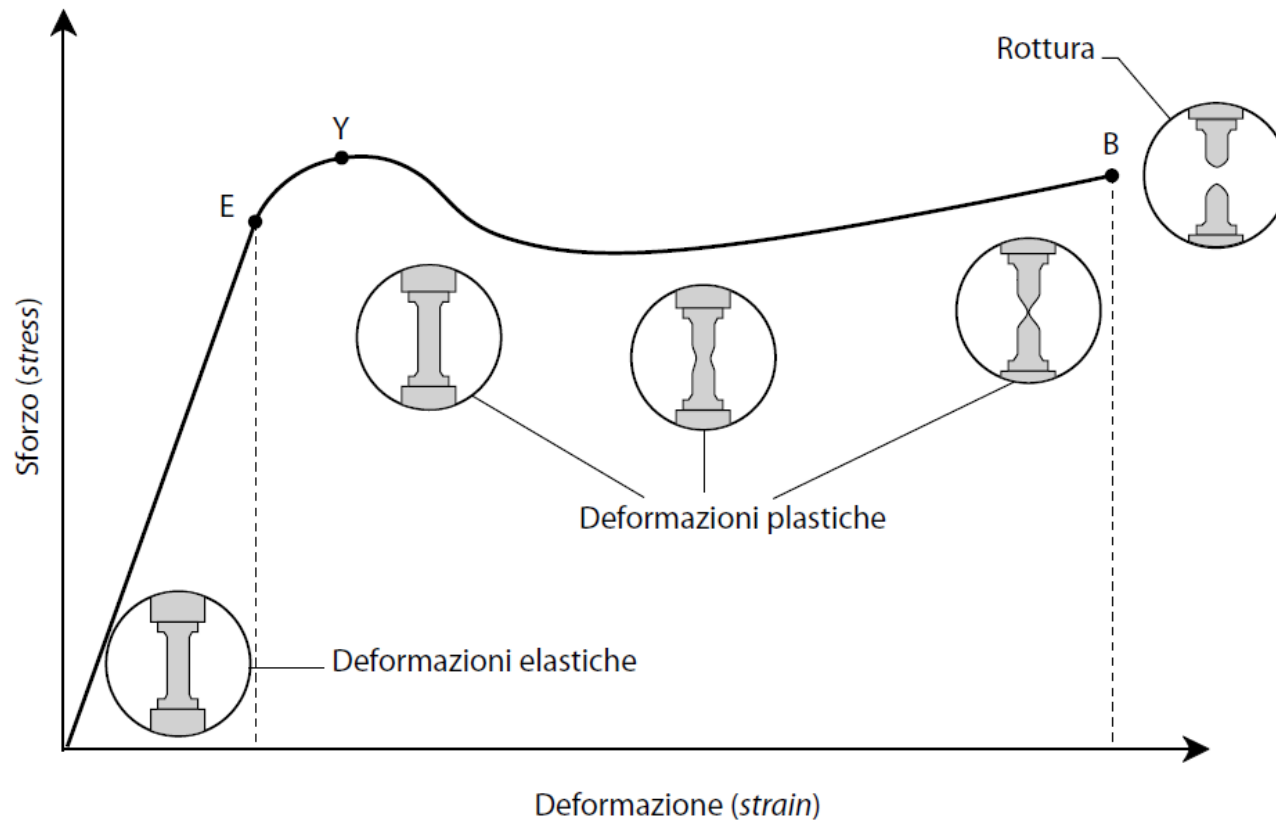
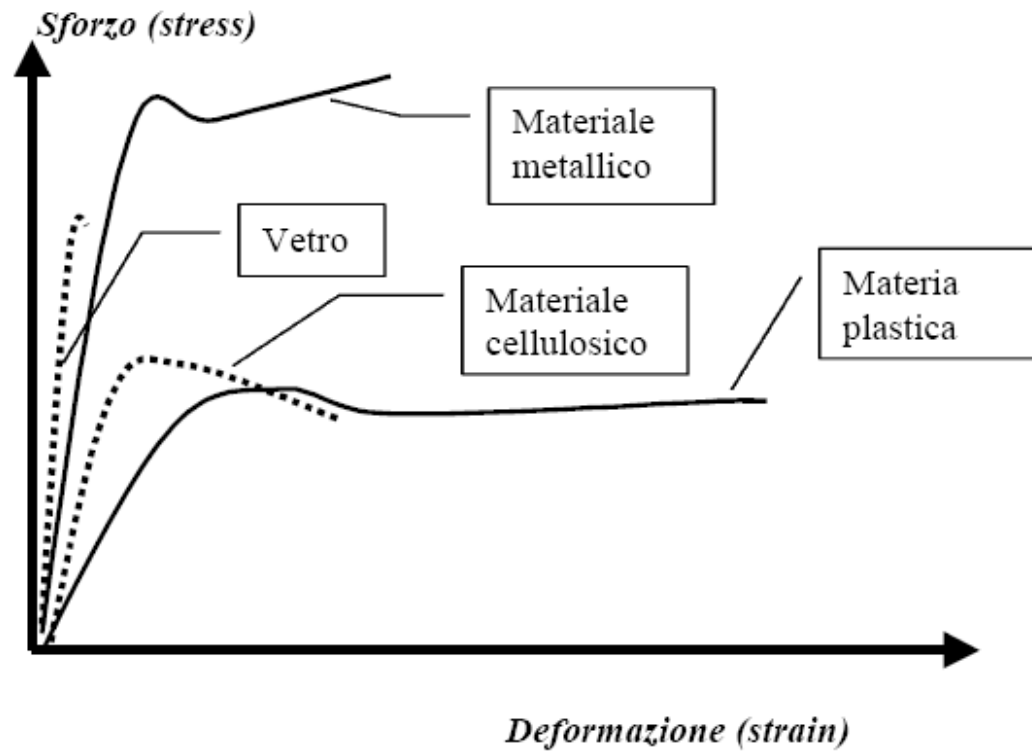


Figura 3.9 Comportamento di un provino sottoposto a trazione (curva sforzo/deformazione).

Le proprietà di resistenza meccanica



Test di trazione per i diversi materiali (comportamento ideale).

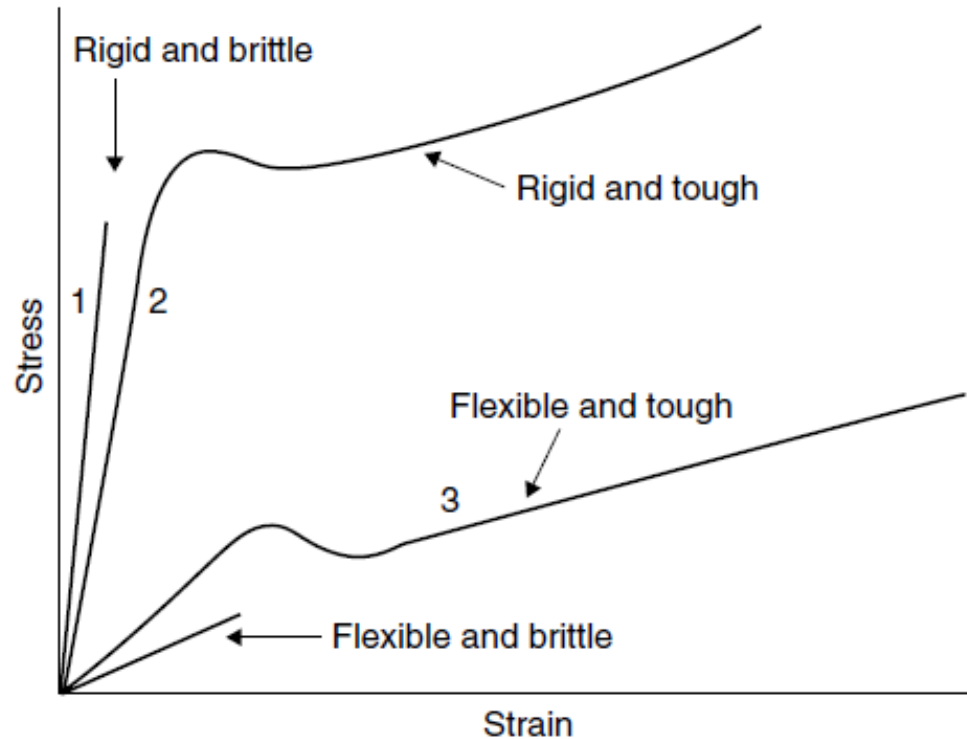
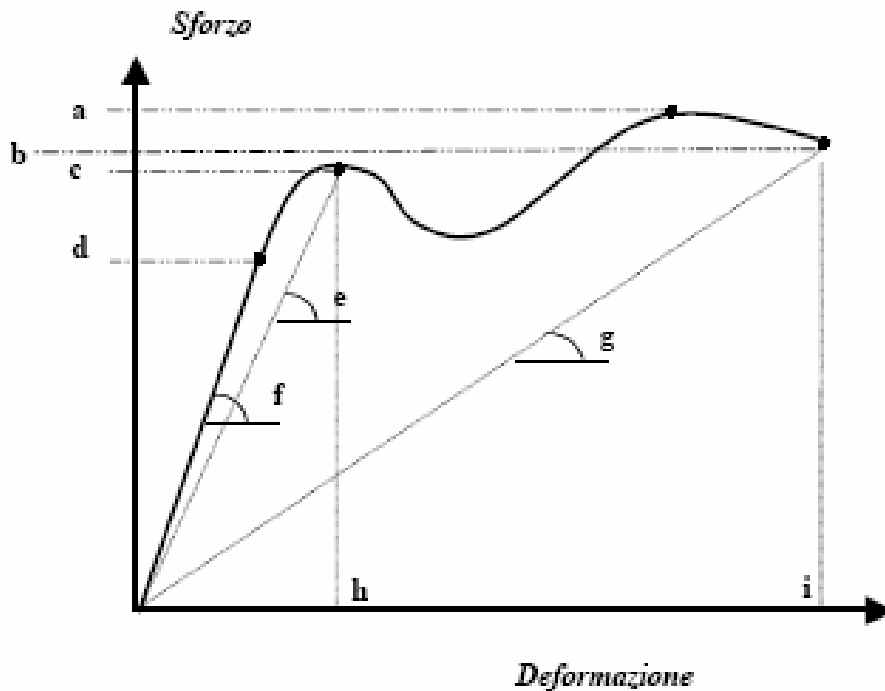


FIGURE 13.22 Stress (force/area) vs. strain (elongation) relationship when the material is stretched at a set rate (distance/time) for a variety of plastic materials having different tensile properties. (From Miltz, J., 1992. In *Handbook of Food Engineering*. D.R. Heldman and D.B. Lund, Eds., New York, Marcel Dekker, Inc., 667–718. Copyright 1992 from *Handbook of Food Engineering* by D.R. Heldman and D.B. Lund. Reproduced by permission of Routledge/Taylor & Francis Group, LLC.)

Le proprietà di resistenza meccanica



a: resistenza alla trazione
(Nmm⁻²)

b: limite di rottura (Nmm⁻²)

c: limite di snervamento (Nmm⁻²)

d: limite di elasticità (Nmm⁻²)

e: modulo di snervamento

f: modulo di elasticità

g: modulo di rottura

h: allungamento allo snervamento (%)

i: allungamento alla rottura (%)

Resilienza: energia necessaria a rompere il provino (area sottesa alla curva)

Parametri quantitativi

• Modulo di elasticità, (modulo di Young, N mm^{-2}):

-più alto è il modulo, maggiore è la rigidità del materiale:

-Corrisponde al rapporto tra lo sforzo e la corrispondente deformazione, rapporto che è costante nel tratto lineare della curva;

-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%);

Parametri quantitativi

- limite di elasticità (limite di proporzionalità, $N\text{ mm}^{-2}$):

 - rappresenta la massima sollecitazione che il materiale è capace di sostenere senza che si verifichi una deviazione dalla proporzionalità diretta tra sforzo e deformazione;

- limite di snervamento ($N\text{ mm}^{-2}$):

 - rappresenta la sollecitazione che corrisponde alla prima significativa inflessione della curva, quando ad un aumento della deformazione non corrisponde un aumento della sollecitazione e la pendenza si annulla;

- modulo di snervamento ($N\text{ mm}^{-2}$):

 - è la pendenza del segmento lineare che unisce l'origine del diagramma al limite di snervamento ed è espresso generalmente in $N\text{ mm}^{-2}$;

Parametri quantitativi

- Allungamento alla rottura:

- incremento percentuale di allungamento della dimensione originale (la 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, N mm^{-2}):

- rappresenta la massima sollecitazione registrata che non corrisponde necessariamente a quella di rottura;

- limite di rottura (sollecitazione di rottura, 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 N mm^{-2} .

TABLE 13.16

Standard Tests for Mechanical Properties of Packaging Materials

ASTM D685 — Practice for conditioning paper and paper products for testing

ASTM D774/D774M — Test method for bursting strength of paper

ASTM D828 — Test method for tensile properties of paper and paperboard using constant-rate-of-elongation apparatus

ASTM D882 — Test method for tensile properties of thin plastic sheeting

ASTM D1596 — Test method for dynamic shock cushioning characteristics of packaging material

ASTM D1922 — Test method for propagation tear resistance of plastic film and thin sheeting by pendulum method

ASTM D 2176 — Test method for folding endurance of paper by the M.I.T. tester

ASTM F0392 — Test method for flex durability of flexible barrier materials

TAPPI T411 — Thickness (Caliper) of paper, paperboard and combined board

TAPPI T414 — Internal tearing resistance of paper (elmendorf-type method)

TAPPI T423 — Folding endurance of paper (Schopper type tester)

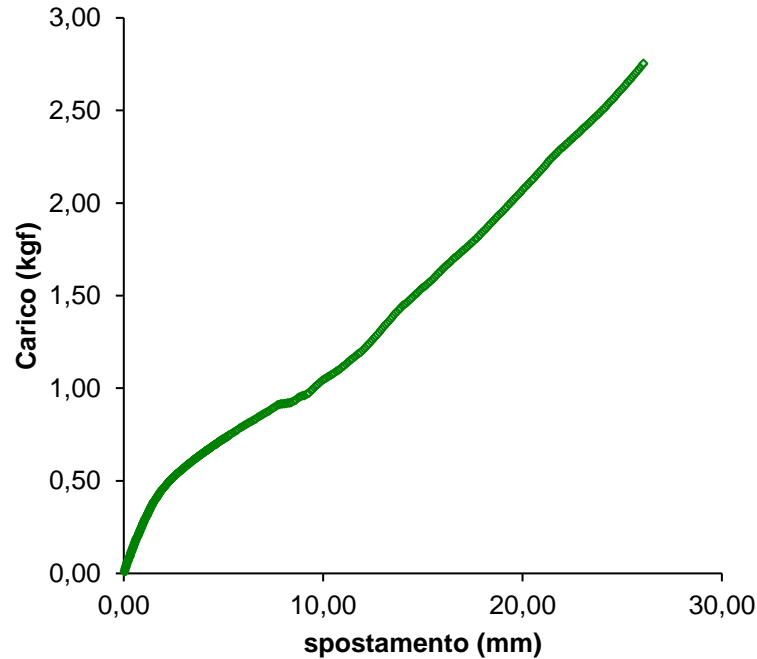
TAPPI T803 — Puncture test of container board

TAPPI T810 — Bursting strength of corrugated and solid fiberboard

TAPPI T811 — Edgewise compressive strength of corrugated fiberboard (Short column test)

Source: From ASTM (2002). *Consumer and Healthcare Packaging Standards*. Philadelphia, American Society for Testing and Materials, 366; (2003). *Selected ASTM Standards on Packaging*. Philadelphia, American Society for Testing and Materials, 493.

Carico (kgf)	Spostamento (mm)
0	0
0,035	0,008
0,052	0,016
0,069	0,024
0,085	0,030
0,102	0,035
0,119	0,040
0,135	0,046
0,152	0,051
0,169	0,056
0,185	0,062
0,202	0,064
.....
25,884	2,730
25,968	2,741
26,051	2,752
26,068	2,754



LO (mm)	Larghezza (m)	Spessore (m)	Area (m ²)
53	0.025	0,0000596	Larghezza*spessore

Sforzo (stress)=Carico/Area

Deformazione(strain)=(Spostamento/LO)*100

Parametri quantitativi

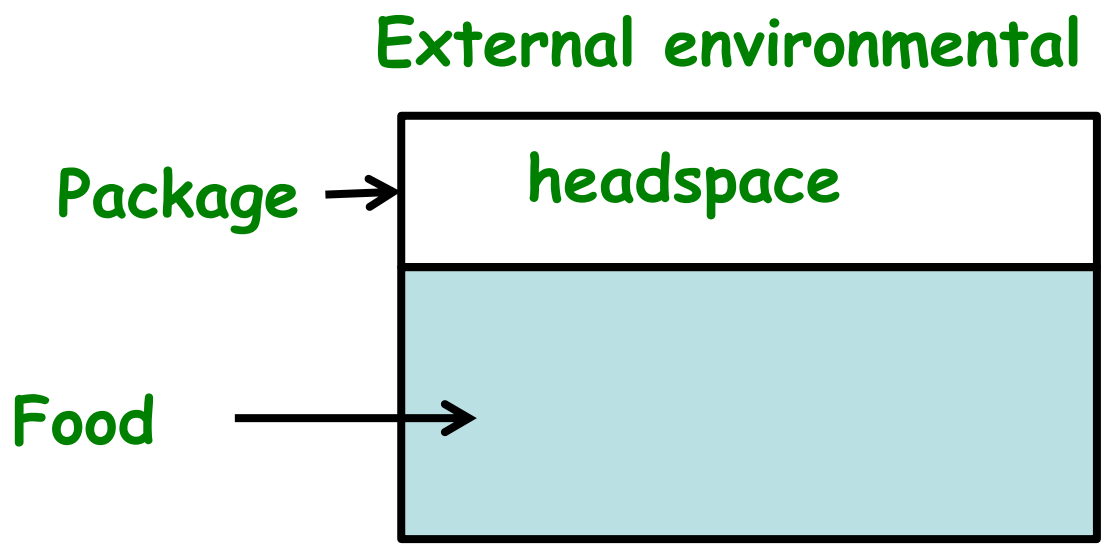
Alcuni valori delle principali proprietà meccaniche misurate in test di resistenza alla trazione di alcuni materiali di confezionamento (valori indicativi)

MATERIALE	Modulo di elasticità (MPa)	Allungamento alla rottura (%)	Limite di rottura (MPa)
Poliestere 23 μ m	4000 - 5000	50 - 120	170 - 270
Polipropilene	2000 - 3500	600 - 800	35 - 50
Alluminio	70000	-	70 - 210
Banda stagnata	1800000		330 - 740
Carta Kraft	-	-	25 - 115
Vetro	70000	-	70

Caratteristiche	Unità di misura	Valore	Norma di Riferimento
Generali			
Spessore	micron	47	
Grammatura	gr. / m ²	46	
Densità	gr. / cm ³	0,96	
Rendimento	m ² / Kg	21.7	
Proprietà barriera			
O ₂	cm ³ / m ² X 24 h X atm a 23°C, 0% UR	1,5	ASTM D 3985-95
CO ₂	cm ³ / m ² X 24 h X atm a 23°C, 0% UR	5	
N ₂	cm ³ / m ² X 24 h X atm a 23°C, 0% UR	< 1	
H ₂ O	gr. / m ² X 24 h a 38°C, 98% UR	5,5	ASTM F 1249-90
Proprietà meccaniche		L T	
Carico di rottura	N / mm ²	62 70	ASTM D 882
Allungamento a rottura	%	84 72	ASTM D 882
Resistenza alla lacerazione	gr.	123 106	ASTM D 1938
Resistenza alla puntura	gr.	14,7	

Progettazione dell'imballaggio

• Livello Primario:



		Environments		
		Physical	Ambient	Human
Functions	Containment			
	Protection			
	Convenience			
	Communication			

FIGURE 1.1 Functions/environments grid for evaluating package performance. (From Lockhart, H.E., *Packag. Technol. Sci.*, 10, 237, 1997.)

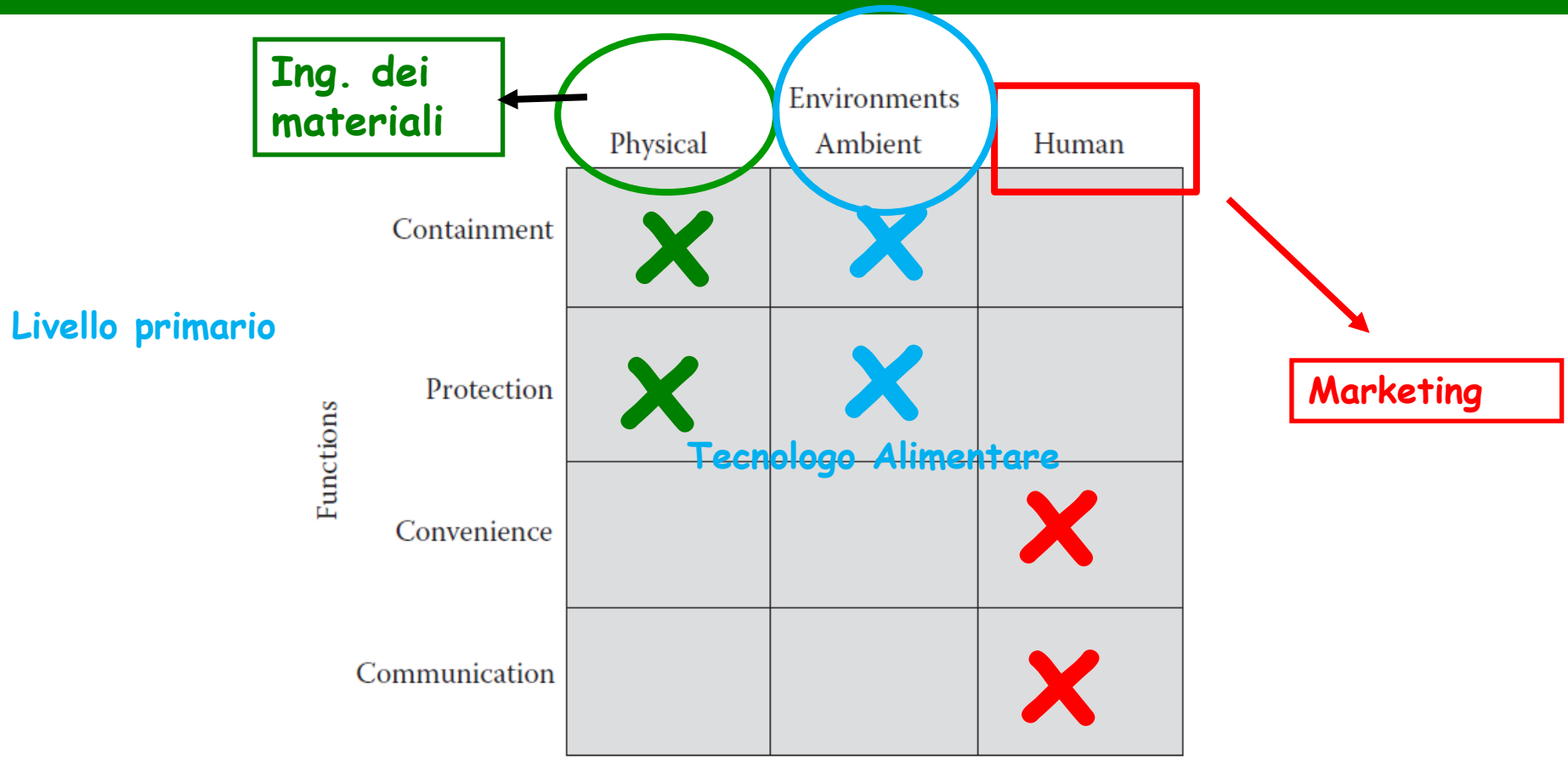
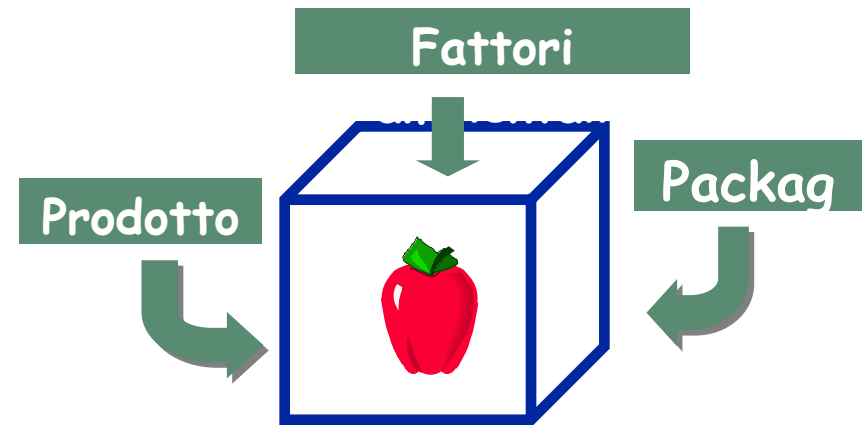
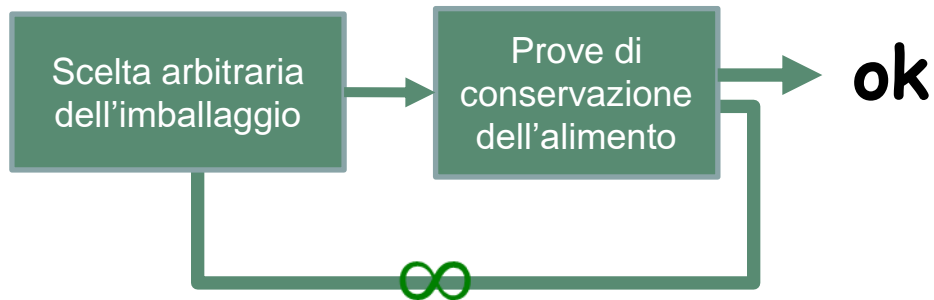


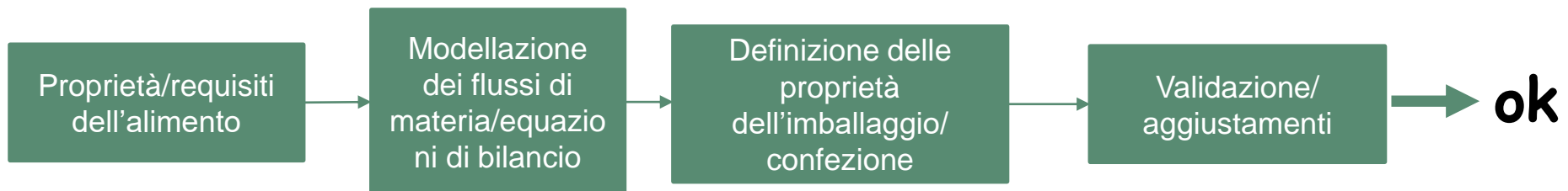
FIGURE 1.1 Functions/environments grid for evaluating package performance. (From Lockhart, H.E., *Packag. Technol. Sci.*, 10, 237, 1997.)

Problema di progetto: *Le caratteristiche del sistema sono note e bisogna individuare il valore delle variabili di processo per ottenere i prodotti con determinate caratteristiche*

Approccio empirico (trial and error or pack and pray)



Approccio ingegneristico:



Principi di progettazione di un imballaggio

- Approccio Ingegneristico

- ✓ Principi di base:

- Principio di conservazione della massa e equazioni di bilancio

$$IN - OUT \mp GEN = ACC$$



- ✓ Procedura di analisi

1. Comprendere cosa si vuole conoscere
2. Disegnare un diagramma
3. Selezionare e specificare i componenti e le condizioni al contorno
4. Definire un modello fisico/matematico
5. Risolvere le equazioni
6. Analizzare criticamente la soluzione

Principi di progettazione di un imballaggio

- ✓ Comprendere cosa si vuole conoscere:
Ex: definire la permeabilità all'ossigeno del film di confezionamento
- ✓ Disegnare un diagramma e scrivere il bilancio di materia



*Bilancio di materia introno
al sistema chiuso "confezione"*

$$\bar{\Gamma}GEN = ACC$$

- ✓ Selezionare e specificare le caratteristiche e le condizioni al contorno
- ✓ Definizione del modello fisico/matematico
- ✓ Risolvere le equazioni
- ✓ Analizzare criticamente la soluzione

Principi di progettazione di un imballaggio

- ✓ Selezionare e specificare le caratteristiche e le condizioni al contorno
 - Ex: La confezione è realizzata con un film flessibile di 40 micron di area 0,02 m².
L'alimento da confezionare è un prodotto di IV gamma vegetale (mele). Si vogliono confezionare 150 g di prodotto. L'atmosfera di conservazione deve essere del 5% di O₂ e 15% di CO₂. La temperatura di conservazione è di 5°C.
- ✓ Definizione del modello fisico/matematico
 - Equazioni di trasferimento di materia e/o equazioni cinetiche
- ✓ Risolvere le equazioni
 - Sistemi a 1, 2, 3 equazioni. In base alla complessità di può ricorrere a risolutori disponibili in sistemi di calcolo
- ✓ Analizzare criticamente la soluzione
 - I valori ottenuti sono realistici? Ex. Un valore di permeabilità non potrà mai essere negativo

- **Materiale didattico:**
- Capitolo 1: Libro di Testo «Food Packaging» di Piergiovanni & Limbo
- Handbook of food packaging-Krochta (allegato)
- Capitolo 1: Libro Food Packaging, Principles and Practice by Robertson

- **Conoscenze acquisite:**
- Terminologia e classificazione di un sistema di imballaggio:
 - Che cosa è un imballaggio?
 - Che cosa è un imballaggio primario, secondario, terziario etc...
- Funzioni del sistema di confezionamento
- Aspetti generali relativi alla progettazione di un imballaggio
 - Quali sono gli aspetti che ricadono sotto la responsabilità di un tecnologo alimentare
 - Quali esigenze bisogna considerare?
 - Qual è il ruolo dell'imballaggio?
 - Approccio ingegneristico alla progettazione