

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

a.a. 2023/2024



Politecnico di Torino

Tesi di Laurea di II livello

**Studio del processo di produzione e qualifica dimensionale dei
vasi in vetro per l'uso agroalimentare**

Relatore:

Prof. Maurizio Galetto

Co-relatore:

Dott. Giacomo Maculotti

Candidato:

Arianna Selvaggio

Matricola:

305548

Novembre 2024

Ai miei nipoti

Raffaele, Stella, Giulia e Greta.

Abstract

Il presente elaborato di tesi verte sull'analisi del processo di produzione e sulla qualifica dimensionale dei vasi in vetro destinati al settore agroalimentare, con l'obiettivo di individuare delle linee guida per il miglioramento dei relativi processi produttivi e di controllo qualità. Contestualizzato il tema, si introduce lo studio attraverso l'analisi del processo produttivo dei vasi, nonché dei principali difetti che possono occorrere durante le lavorazioni. A questo riguardo, si descrivono i requisiti dei vasi in vetro, ponendo particolare attenzione alle loro caratteristiche dimensionali e geometriche. Pertanto, si procede con un'approfondita analisi della normativa vigente, sia dal punto di vista della regolamentazione nazionale e internazionale, sia per quanto riguarda gli Standard tecnici di riferimento. Particolare attenzione è posta all'individuazione di metodologie per la verifica dimensionale e geometrica dei vasi, con focus specifico su alcune delle tecnologie di controllo più avanzate attualmente implementabili nel settore. Infine, è analizzato un *caso studio*, corredato da un'attività di laboratorio, al fine di applicare le conoscenze acquisite dalla revisione della letteratura.

Indice

1. Introduzione.....	4
2. La produzione dei vasi	6
2.1 Il processo produttivo.....	6
2.1.1 Fusione.....	6
2.1.2 Formatura.....	8
2.1.3 Trattamenti superficiali e termici.....	9
2.1.4 Ispezione dei contenitori e controllo qualità.....	10
2.2 Localizzazione e classificazione dei difetti.....	10
2.2.1 Difetti dimensionali.....	11
2.2.2 Difetti geometrici.....	11
2.2.3 Difetti meccanici e termici.....	12
3. Le caratteristiche dei vasi	14
3.1 La nomenclatura.....	14
3.2 I requisiti.....	16
3.2.1 La composizione chimica.....	17
3.2.2 Le caratteristiche geometriche.....	18
3.2.3 Le caratteristiche dimensionali.....	21
3.2.4 Le proprietà meccaniche e termiche.....	23
4. Analisi della normativa.....	25
4.1 I Regolamenti europei.....	26
4.2 La normativa statunitense.....	27
4.3 La normativa italiana.....	27
4.4 Gli Standard tecnici.....	27
4.4.1 BS ISO 9058:2008 Glass containers - Standard tolerances for bottles....	28
4.4.2 BS EN ISO 8113:2004 Glass containers - Resistance to vertical load - Test method.....	30
4.4.3 BS EN ISO 7459:2004 Glass containers - Thermal shock resistance and thermal shock endurance - Test methods.....	32
4.4.4 BS EN ISO 8106:2004 Glass containers - Determination of capacity by gravimetric method - Test method.....	35

4.4.5 BS EN 12980:2000 Materials and articles in contact with foodstuffs - Non-metallic articles for catering and industrial use - Method of test for the determination of impact resistance.....	38
4.4.6 UNI 9302:1988 Contenitori di vetro - Determinazione della resistenza all'urto.....	41
4.4.7 UNI EN 29885:1996 Contenitori di vetro a bocca larga - Scostamento dalla planarità della superficie di tenuta superiore - Metodi di prova.....	42
4.4.8 UNI EN 29009:1996 Contenitori di vetro - Altezza e non parallelismo della bocca con riferimento alla base del contenitore - Metodi di prova.....	44
4.4.9 UNI EN 29008:1996 Bottiglie di vetro - Verticalità - Metodo di prova...	46
4.4.10 C149 - 14 Standard Test Method for Thermal Shock Resistance of Glass Containers.....	49
4.4.11 C224 - 78 Standard Practice for Sampling Glass Containers.....	51
5. Verifica dimensionale e geometrica dei vasi.....	53
5.1 Sistemi per la verifica in linea.....	53
5.1.1 Le fotocamere a scansione lineare.....	54
5.1.2 Gli scanner 3D.....	56
5.2 Strumenti e tecniche di laboratorio.....	60
5.2.1 Le macchine di misura a coordinate.....	61
5.2.2 La tomografia computerizzata a raggi X.....	63
5.2.3 Il microscopio a forza atomica.....	65
6. Il caso Saclà.....	68
6.1 Introduzione al caso studio.....	68
6.2 I requisiti dei vasi	69
6.3 Il controllo in accettazione dei vasi.....	72
6.4 Le criticità.....	76
6.5 Le proposte.....	78
6.6 L'attività sperimentale.....	80
6.6.1 Il fondo.....	81
6.6.2 La parete laterale.....	82
6.6.3 I risultati.....	83
7. Conclusioni.....	84
Bibliografia e Sitografia.....	86

Ringraziamenti..... 90

1. Introduzione

Il settore agroalimentare rappresenta uno dei pilastri dell'economia globale, coinvolgendo un'ampia gamma di attività che spaziano dalla produzione agricola alla trasformazione e distribuzione dei prodotti alimentari. Essendo questo un contesto caratterizzato da crescenti aspettative da parte dei consumatori, riguardo a sicurezza, qualità e sostenibilità, le imprese sono sempre più motivate a investire in soluzioni affidabili, tra cui quelle relative al confezionamento degli alimenti.

In questo contesto, il vetro si distingue per le sue proprietà uniche. La sua natura amorfa, l'inerzia chimica, la capacità di preservare il sapore e la freschezza degli alimenti, la durabilità nel tempo, la trasparenza e la riciclabilità, lo rendono, ad oggi, un materiale altamente igienico, sicuro e sostenibile [1,2,72].

Tuttavia, l'uso del vetro nel settore del confezionamento alimentare risale a epoche antiche: la produzione delle prime bottiglie di vetro, destinate principalmente alla conservazione di liquidi e alimenti, è, infatti, riconducibile all'Antico Egitto e a Roma. Successivamente, con l'avvento del Medioevo, la produzione di vetro per contenitori alimentari continuò a evolversi, sebbene a un ritmo più lento rispetto ai periodi precedenti. Infatti, in questo periodo i vasi in vetro erano principalmente utilizzati per scopi decorativi. Solo con il Rinascimento e i successivi sviluppi del periodo moderno il vetro iniziò a consolidarsi come materiale per il confezionamento alimentare, sebbene non fosse ancora un utilizzo diffuso [72].

In particolare, è con l'industrializzazione e l'introduzione dei processi di produzione meccanici del XIX secolo, che la fabbricazione di contenitori in vetro per uso alimentare subì un'evoluzione significativa. La possibilità di produrre bottiglie e vasi in modo più uniforme e resistente ne favorì una diffusione sempre maggiore nel settore alimentare. Durante il XX secolo, il crescente fabbisogno di imballaggi sicuri e durevoli consolidò ulteriormente l'impiego del vetro come materiale primario nel packaging alimentare [72].

Nel corso del tempo, lo sviluppo tecnologico nel settore della produzione del vetro ha comportato significativi miglioramenti nella resistenza e nella leggerezza dei contenitori. In particolare, l'introduzione di tecniche di produzione avanzate ha permesso la creazione di

contenitori in vetro sempre più sofisticati, in grado di rispondere alle esigenze del mercato moderno.

Tuttavia, l'intrinseca fragilità del materiale e la potenziale presenza di difetti sulla superficie dei vasi, come risultato delle lavorazioni eseguite in fase di produzione, nonché un dimensionamento impreciso degli stessi, rendono i contenitori in vetro suscettibili a fratture.

Da qui l'importanza della qualifica dimensionale dei vasi, al fine di garantire l'utilizzo di prodotti affidabili, in grado di rispondere ai requisiti di conformità previsti per la loro destinazione d'uso.

In merito, la presente tesi vuole studiare le caratteristiche e i requisiti dei vasi in vetro per l'uso alimentare, nonché il relativo processo produttivo e le annesse metodologie di verifica dei requisiti.

A tal fine, lo studio si è concretizzato (i) in un'approfondita revisione della letteratura, le cui fonti principali sono articoli scientifici, testi accademici, norme tecniche, Regolamenti e Direttive e pubblicazioni di aziende operanti nel settore; (ii) nella discussione di un *caso studio* per contestualizzare e interpretare da un punto di vista pratico quanto emerso dall'analisi della letteratura e (iii) in un'attività di laboratorio volta a sperimentare un approccio relativamente semplice, ma efficace, per testare la texture superficiale dei vasi.

In conclusione, la presente tesi si propone di fornire indicazioni preziose e dettagliate per il miglioramento dei processi di controllo qualità e di produzione dei vasi in vetro destinati al confezionamento alimentare, nonché di facilitare l'adozione di soluzioni innovative e più efficaci, garantendo, così, che i prodotti in vetro rispondano alle crescenti aspettative del mercato agroalimentare.

2. La produzione dei vasi

2.1 Il processo produttivo

Vista la geometria del prodotto, il processo produttivo dei vasi in vetro per l'uso alimentare può essere ricondotto a quello per la fabbricazione del vetro cavo. Questo si articola in cinque fasi [1]:

1. Miscelazione delle materie prime;
2. Fusione;
3. Formatura;
4. Trattamenti superficiali e termici;
5. Ispezione dei contenitori e controllo qualità.

In particolare, nel caso dei vasi a bocca larga la formatura avviene mediante un processo denominato *presso-soffio* [2], dal momento che questo è particolarmente indicato per la produzione di vasi con una dimensione della finitura del collo ≥ 35 mm [1].

2.1.1 Fusione

Le materie prime vergini e il vetro riciclato o di scarto (*cullet*), opportunamente conservati in silos, una volta controllati, pesati e mescolati, sono trasportati presso la linea di produzione dove, nella maggior parte dei casi, l'impianto di caricamento della miscela vetrificabile alimenta in modo automatico e continuo il forno [2,3] (Figura 1).

Per questa fase possono essere impiegate tre tipologie di forno [3]:

- Forno End-fired;
- Forno Cross-fired;
- Forno a recupero.

In generale, l'utilizzo di un forno fusorio alimentato tramite olio combustibile ed energia elettrica garantisce un miglior affinaggio e la rispondenza dei parametri di colore alle specifiche di prodotto, che nel caso dei contenitori per alimenti è sostanzialmente bianco [4].

Il processo di fusione si articola in due fasi: la prima ha come obiettivo quella di fondere la miscela vetrificabile, la seconda di affinare il composto [2]. Inizialmente, la miscela è fusa a una temperatura tra 1500 e 1600 °C, quindi è indirizzata in canali di condizionamento dove

il vetro è raffreddato o riscaldato con l'obiettivo di renderlo omogeneo, eliminando eventuali bolle e stabilizzandone la temperatura (per i contenitori per alimenti o bevande gassate la temperatura adatta alla formatura è di 1100°C circa) [1,3] (Figura 1).

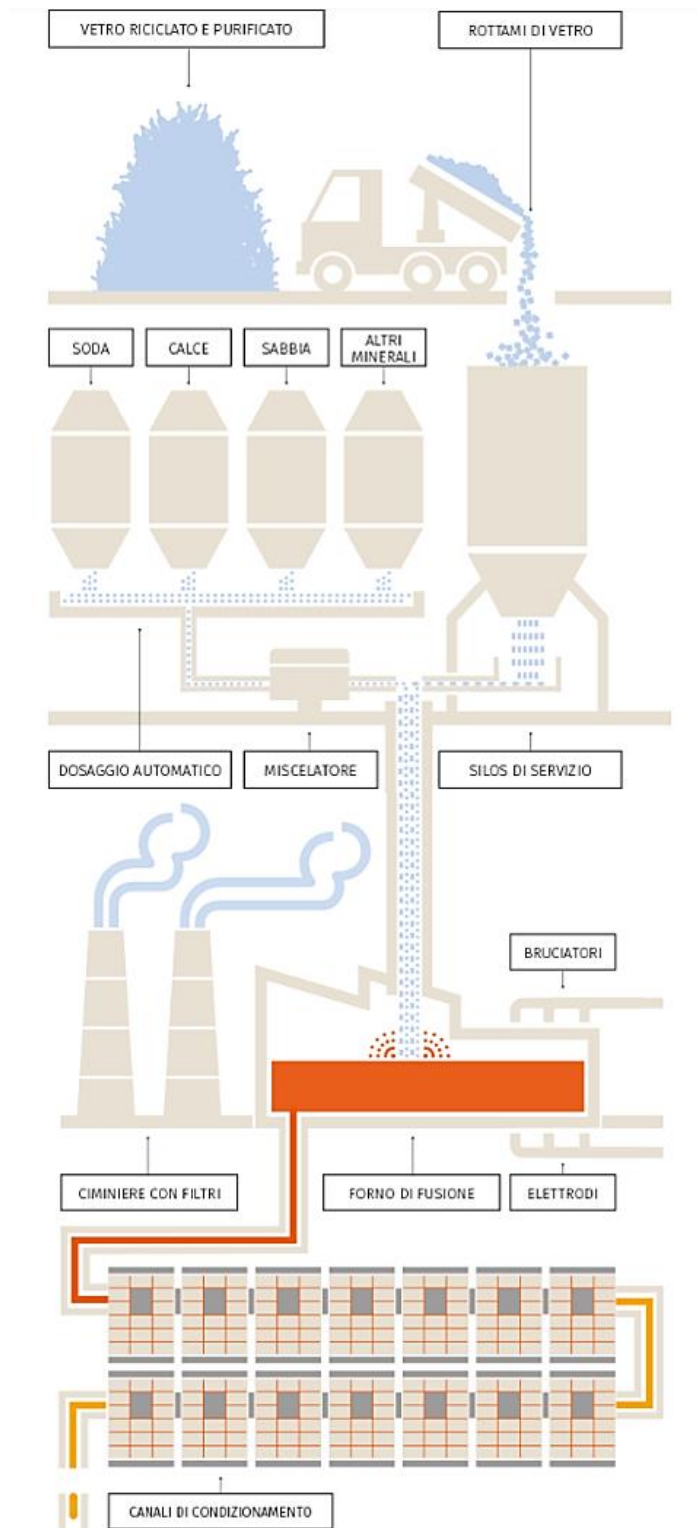


Figura 1: miscelazione delle materie prime e fusione del vetro. Fonte: VetriSpeciali [69]

In particolare, l'aggiunta di *cullet* alla miscela consente di fondere il materiale con un consumo energetico inferiore rispetto a quello richiesto dall'utilizzo di sole materie prime vergini [2]. Inoltre, il rottame riduce la quantità di polveri e altre particelle che spesso accompagnano la miscela [60].

2.1.2 Formatura

Dopo il transito nei canali di condizionamento, il vetro fuso arriva all'alimentatore della macchina formatrice. Nel dispositivo di alimentazione (Figura 2), la miscela è sottoposta a estrusione e tagliata in porzioni cilindriche che prendono il nome di *goccia* (*gob*). Nello specifico, il peso delle gocce deve essere pari a quello dei vasi che si vogliono realizzare [1].

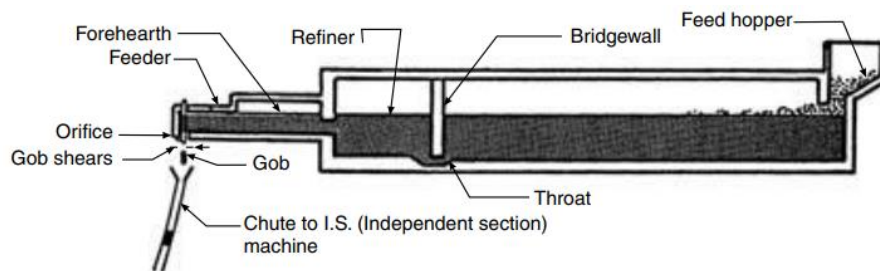


Figura 2: dispositivo di alimentazione. Fonte Food packaging Technology [1]

A questo punto, la goccia è lasciata cadere attraverso una serie di deviatori fino alla macchina di formatura, nota come *macchina IS* o a sezioni individuali, dove, mediante meccanismi ad imbuto, è prima convogliata negli stampi abbozzatori e, successivamente, negli stampi finitori, dove il vetro assume la forma desiderata solidificandosi [1] (Figura 3).

Sul lato abbozzatore della macchina formatrice avviene il pre-stampaggio della goccia, ricavando, così, una tasca cava con l'imboccatura del vaso finita detta *abbozzo* (o *parison*) [1]. Le componenti meccaniche coinvolte in questa fase sono il *maschietto meccanico* e il *collarino* (o *neck-ring*), rispettivamente utilizzati per creare la cavità dell'abbozzo e formare la parte esterna dell'imboccatura del contenitore [61].

Successivamente, il *parison* è invertito e trasferito al lato finitore dell'IS dove si realizza con aria compressa la formatura del contenitore nella geometria definitiva. Il vaso emerge da questa fase a una temperatura di circa 650 °C [1].

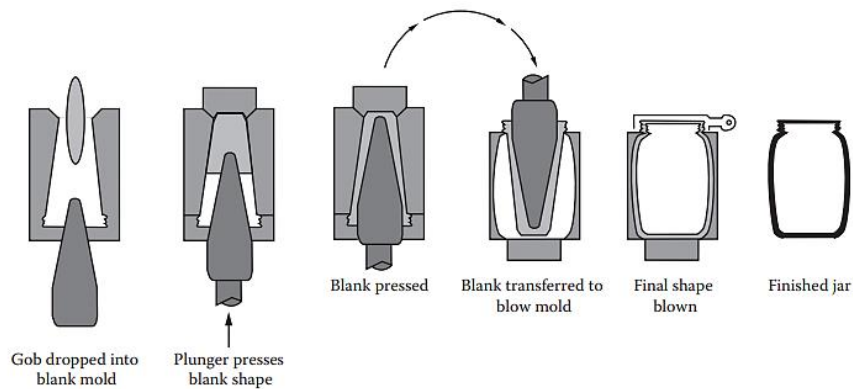


Figura 3: processo press and blow per i contenitori a bocca larga. Fonte: *Food Packaging: Principles and Practice, Third Edition* [2]

2.1.3 Trattamenti superficiali e termici

Una volta formato il vaso, la fase successiva del processo produttivo consiste nel trattamento superficiale di tipo hot-end [62]. Lo scopo di questo trattamento è quello di prevenire danni alla superficie del contenitore quando questo è ancora caldo, nonché di preservarne la resistenza. Proprio per questo motivo è applicato subito dopo la formatura del vetro, a temperature elevate [1,2]. Tale trattamento consiste nell'applicazione di un materiale di rivestimento sui vasi, come l'ossido di stagno (SnO_2) o il tetracloruro di stagno (SnCl_4), sebbene in alcuni casi siano impiegati anche derivati del titanio come il cloruro di titanio (TiCl_4) [1,4].

Successivamente, si produce con la ricottura del contenitore. In particolare, questo trattamento è essenziale per eliminare dal vetro eventuali tensioni residue indotte da un raffreddamento troppo rapido del prodotto o dai gradienti di temperatura delle diverse lavorazioni di processo. Stabilizzando il vetro è, infatti, possibile migliorarne la resistenza e prevenire la rottura del vaso [63]. La ricottura si articola in due fasi: la prima consiste nel riscaldamento del contenitore a temperatura superiore a quella di trasformazione, la seconda in un raffreddamento controllato da $560\text{ }^\circ\text{C}$ circa a temperatura ambiente [63,4].

Terminata la ricottura, l'applicazione di un ulteriore trattamento superficiale ai vasi consente di modificarne le proprietà meccaniche [1,2].

Pertanto, è applicato il trattamento cold-end, il cui scopo è quello di creare una superficie lubrificata in grado di resistere a forti pressioni o getti d'acqua e che faciliti il flusso dei vasi sulle linee di riempimento ad alta velocità. Dunque, il trattamento consiste nell'applicazione mediante spruzzo o vapore di un materiale organico, in una base acquosa contenente cere,

stearati, silicani, acido oleico o polietilene, sulla superficie esterna del contenitore. In tal modo è, quindi, possibile ottenere una superficie con un basso coefficiente di attrito [1,2].

2.1.4 Ispezione dei contenitori e controllo qualità

Una volta terminati i trattamenti superficiali, i vasi sono sottoposti ai processi di controllo qualità che hanno l'obiettivo di verificarne le caratteristiche chimiche e fisiche, nonché la presenza di eventuali difetti visibili [1]. Tali verifiche comprendono sia l'ispezione in linea dei vasi, manuale e/o automatica, sia l'analisi in laboratorio di un campione di contenitori e includono il controllo della composizione chimica del vetro, delle tolleranze dimensionali e geometriche dei vasi, i test per il colore, le prove di resistenza meccanica e termica come, per esempio, la resistenza agli urti e allo shock termico [1].

A questo punto, i vasi che hanno superato il controllo qualità sono imballati e stoccati in magazzino, in attesa di essere spediti agli stabilimenti di confezionamento alimentare [3].

2.2 Localizzazione e classificazione dei difetti

Affinché sia possibile ottenere dei contenitori di qualità, è, quindi, necessario un accurato monitoraggio dei seguenti parametri di processo:

- La temperatura di fusione del vetro;
- La pressione e il tempo di pressatura e soffiaggio;
- La temperatura di riscaldamento e di raffreddamento dei contenitori;
- La pulizia e la manutenzione delle macchine e degli stampi;
- I fattori ambientali, come l'umidità o la presenza di polveri.
- Le modalità con cui sono svolti la ricottura e i trattamenti superficiali, nonché la tipologia di sostanze trattanti utilizzate.

Infatti, eventuali scostamenti di queste variabili dagli standard di produzione possono comportare la comparsa di difetti sui vasi che, in base alla gravità con cui si presentano, sono distinguibili in [1,5,6]:

- Difetti critici: compromettendo gravemente la sicurezza e l'integrità strutturale del contenitore, costituiscono un rischio per l'utente;
- Difetti primari: sono responsabili della rottura del vaso sulla linee di riempimento;

- Difetti funzionali: compromettono la corretta conservazione del prodotto;
- Difetti estetici: non compromettono l'integrità del pezzo, ma influenzano negativamente l'aspetto del vaso.

Tra tutti, più complessa è l'individuazione dei difetti non direttamente osservabili mediante ispezione visiva, come quelli dimensionali, geometrici, meccanici e termici. Pertanto, nel Capitolo 5 del presente elaborato saranno analizzate alcune metodologie d'ispezione implementabili per garantire la conformità dimensionale e geometrica dei vasi in vetro, oltre a quanto sarà presentato nel Capitolo 4, mentre per testare le proprietà meccaniche e termiche risulteranno esaustive le prove specificate dalla Normativa.

Pertanto, per i difetti non esplicitamente trattati in questa sede si rimanda ai documenti specifici: *Scheda Elenco Difetti sui Contenitori* [5] e *Difetti dei contenitori di vetro Cause e rimedi* [7].

2.2.1 Difetti dimensionali

I difetti dimensionali sono sostanzialmente difetti primari, funzionali ed estetici. Di seguito, sono riportate alcune delle tipologie più frequenti di difetto dimensionale [5,7]:

- Altezza non a specifica;
- Dimensioni della bocca fuori specifica;
- Dimensione del collo fuori specifica;
- Dimensione della spalla fuori specifica;
- Diametro del corpo fuori specifica;
- Diametro del fondo fuori specifica;
- Capacità del contenitore fuori specifica;
- Spessori delle pareti non a specifica (Figura 4).

2.2.2 Difetti geometrici

I difetti geometrici, macroscopici e microscopici, sono difetti primari, funzionali ed estetici. Alcuni dei più frequenti sono [5,7]:

- Non parallelismo della bocca rispetto al fondo del contenitore (Figura 5);
- Non planarità della bocca (Figura 6);

- Profilo dell'imboccatura fuori specifica;
- Verticalità fuori specifica (Figura 7);
- Difetti della texture della superficie;
- Ovale fuori specifica;

2.2.3 Difetti meccanici e termici

I difetti meccanici e termici sono sostanzialmente difetti primari e funzionali, le cui tipologie più diffuse sono [5]:

- Resistenza al carico assiale fuori specifica;
- Resistenza all'urto fuori specifica;
- Resistenza allo shock termico fuori specifica.

In tutti questi casi, nonostante il processo *presso-soffio* consenta di ottenere un migliore controllo nella distribuzione del vetro [1], la causa principale della difettosità è da ricercare all'interno della fase di formatura e, in particolare, nel tipo di attrezzatura utilizzata. Nel caso della resistenza all'urto, inoltre, particolarmente impattante è anche il tipo di trattamento superficiale selezionato per il contenitore, ovvero la sostanza trattante e i parametri della lavorazione [5,7]. Per la resistenza del vetro, infine, particolarmente, impattante è anche il processo di ricottura [64].

In particolare, i fattori che amplificano la probabilità di rottura dei vasi di vetro sono:

- I difetti della texture superficiale, dal momento che micrograffi, crepe e inclusioni, abrasioni e altre irregolarità agiscono come concentratori di stress sotto carico, contribuendo alla rottura [2,64]. Nello specifico, in accordo con la formula di *Griffiths*, la resistenza del vetro dipende dalla dimensione del difetto;
- Le variazioni nello spessore del vetro;
- L'utilizzo di una miscela vetrificabile di scarsa qualità [64];
- La presenza sulla superficie di agenti chimici o contaminanti;
- Variazioni nel peso del vaso. In particolare, la resistenza meccanica potrebbe aumentare con il peso del contenitore a scapito, tuttavia, di quella termica [2].

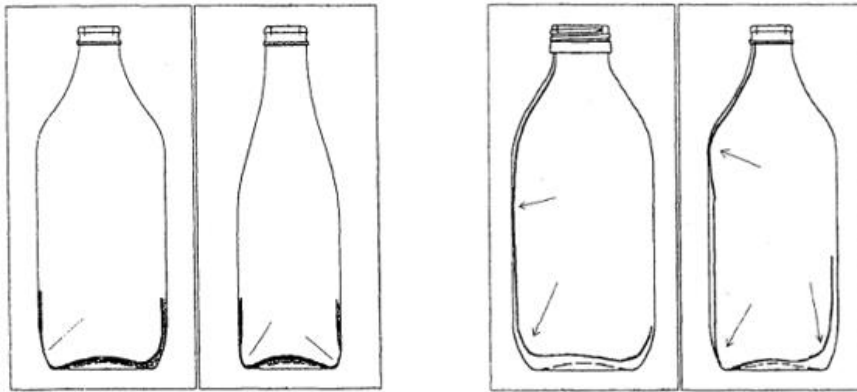


Figura 4: difetti di spessore. A sinistra un esempio di fondo sottile; a destra un esempio di vetro maldistribuito. Fonte: Scheda Elenco Difetti sui Contenitori [5]

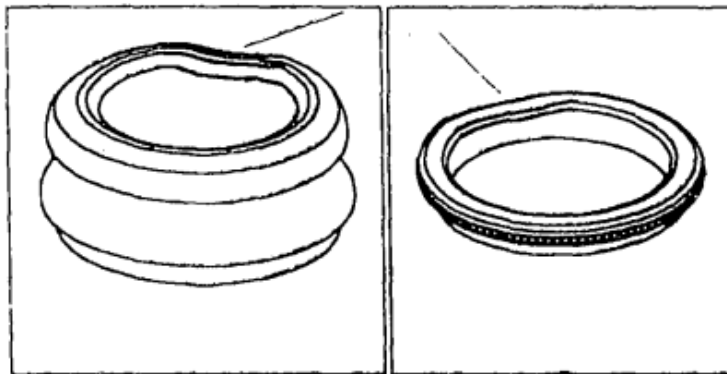


Figura 5: non parallelismo della bocca rispetto al fondo. Fonte: Scheda Elenco Difetti sui Contenitori [5]

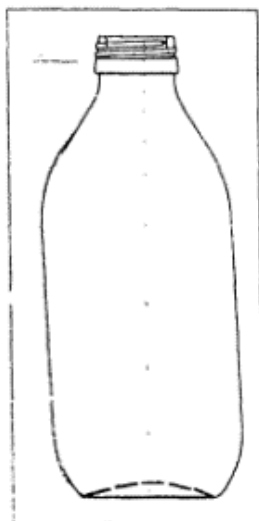


Figura 6: verticalità fuori specifica. Fonte: Scheda Elenco Difetti sui Contenitori [5]

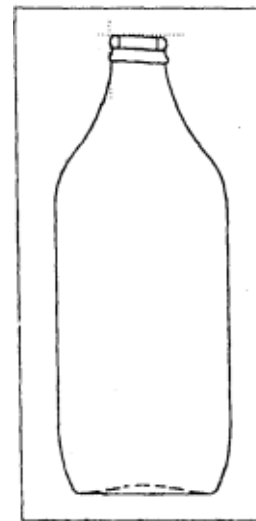


Figura 7: non planarità della bocca. Fonte: Scheda Elenco Difetti sui Contenitori [5]

3. Le caratteristiche dei vasi

Una volta acquisite le nozioni relative alla corretta nomenclatura dei contenitori in vetro, nel seguente capitolo saranno delineati i requisiti dei vasi destinati al confezionamento degli alimenti in termini di composizione chimica, caratteristiche geometriche e dimensionali, nonché delle relative proprietà meccaniche e termiche.

3.1 La nomenclatura

Dal momento che la produzione di un contenitore in vetro implica l'utilizzo di un'ampia varietà di attrezzatura-stampi, tra cui lo stampo abbozzatore, il tampone, il maschio, il collarino, lo stampo finitore e il fondello finitore, è possibile osservare sul contenitore stesso dei segni di congiunzione dovuti al contatto tra queste parti (Figura 8) [61]. Tipicamente, questi segni sono [7]:

- La linea di congiunzione tra collarino e abbozzatore: si presenta come una linea di saldatura orizzontale;
- Il segno di giunzione dell'abbozzatore: si genera in seguito al contatto delle due metà dello stampo abbozzatore ed è rilevato come una linea ondeggiante sul contenitore finito;
- Il segno del tampone: può crearsi sul fondo del contenitore in seguito a un errato accoppiamento tra lo stampo abbozzatore e il tampone;
- Il segno di congiunzione degli stampi finitori: è un segno di congiunzione che corre verticalmente sull'intera lunghezza del contenitore e che si forma in seguito alla chiusura dello stampo attorno al fondello finitore.
- La linea di congiunzione del fondello finitore.

A partire da queste giunture, è, quindi, possibile individuare le parti di un contenitore in vetro, ovvero l'imboccatura, la spalla, il collo, il corpo, il fondo, il raccordo fondo-corpo e la rientranza del fondo (Figura 9) [7].

- L'imboccatura: è la parte superiore del contenitore al di sopra della linea di congiunzione del collarino. Questa comprende la superficie di chiusura, il foro e l'anello sotto бага;

- Il collo: è la parte che va dalla linea di congiunzione del collarino alla curva alla base del collo;
- La spalla: è la parte che si estende dalla base del collo fino alla parte diritta del corpo;
- Il corpo: è la parte principale del contenitore che contiene il prodotto;
- La base (o fondo): è la parte su cui poggia il contenitore quando sta in posizione verticale;
- Il raccordo fondo-corpo: è la curva tra il corpo ed il fondo, che aiuta a migliorare la distribuzione del vetro e, di conseguenza, la resistenza del contenitore;
- La rientranza del fondo: è la parte centrale del fondo, concava verso l'interno del contenitore.

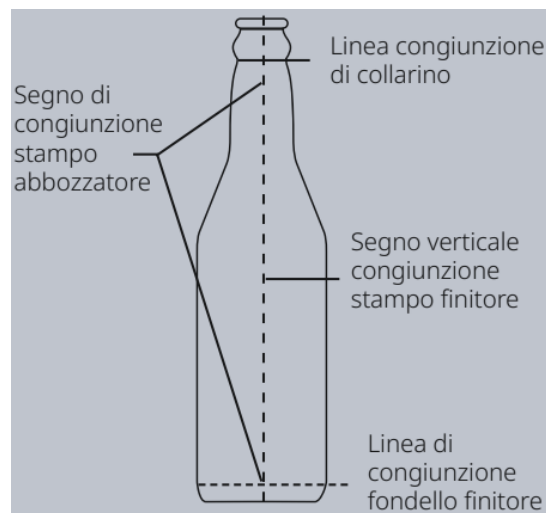


Figura 8: segni di congiunzione di un contenitore in vetro. Fonte: Difetti dei contenitori di vetro Cause e rimedi [7]



Figura 9: Parti di un contenitore in vetro. Fonte: Difetti dei contenitori di vetro Cause e rimedi [7]

Sulla parte terminale del contenitore sono, inoltre, presenti degli elementi utilizzati dai produttori per l'identificazione del prodotto. Per esempio, le protuberanze sul raccordo fondo-corpo e/o le lineette sul fondo consentono all'attrezzatura di ispezione di leggere le informazioni sul contenitore (Figura 10;1). Sul fondo sono poi, tipicamente, riportati il marchio del produttore (Figura 10;2) ed eventuali informazioni aggiuntive che possono includere l'identificazione dello stabilimento, l'anno di produzione, il numero di stampo, la capacità e il livello di riempimento del contenitore (Figura 10;3) [7].



*Figura 10: raccordo fondo-corpo e fondo di un contenitore in vetro.
Fonte: Difetti dei contenitori di vetro Cause e rimedi [7]*

In generale, nel settore del packaging alimentare è realizzata una significativa varietà di contenitori in vetro, date le specifiche esigenze di conservazione, protezione e presentazione del prodotto, nonché il tipo di alimento in essi contenuto [1]. Tuttavia, questa può essere ricondotta a due principali tipi di contenitori: le bottiglie, caratterizzate da colli stretti, e i vasi a bocca larga. In particolare, nel seguente elaborato ci focalizzeremo sulla seconda tipologia di contenitori, in relazione ai quali, nei prossimi paragrafi, saranno illustrate le principali caratteristiche.

3.2 I requisiti

Specificare dei requisiti opportuni per i vasi in vetro per l'uso alimentare è un passaggio fondamentale per garantire la sicurezza, la qualità e l'efficacia nella conservazione degli alimenti. Questi requisiti possono variare a seconda della normativa vigente e delle specifiche applicazioni, ma i principali aspetti da considerare sono [6]:

- La composizione chimica del vetro;
- Le tolleranze geometriche del vaso e la relativa geometria microscopica;

- Le caratteristiche dimensionali;
- Le proprietà meccaniche e termiche del vaso.

3.2.1 La composizione chimica

Il vetro utilizzato per i vasi destinati al contatto con gli alimenti è noto come vetro sodico-calcico e rappresenta circa il 90% di tutto il vetro prodotto [60]. Nella maggior parte dei casi, il silicio è combinato con altri elementi per ottenere delle proprietà specifiche. Per esempio, i fondenti alcalini come il sodio e i carbonati di potassio fungono da stabilizzanti, impedendo al vetro di dissolversi in acqua. Elementi come l'alluminio e il piombo incrementano rispettivamente la durezza e la brillantezza del composto. Inoltre, la presenza del boro nella miscela riduce la lisciviazione del sodio [2]. Tipicamente, le proporzioni degli elementi costituenti il vetro sodico-calcico sono le seguenti:

- 68-73% di silice (SiO_2): nella maggior parte dei casi la silice è ricavata dalla sabbia pura [1,2];
- 10-13% di ossido di calcio (CaO): proveniente dal calcare, ovvero dal carbonato di calcio (CaCO_3), questo composto è in grado di aumentare la resistenza meccanica e la "durabilità chimica" del vetro, cioè la proprietà di non cedere i suoi componenti alle sostanze alimentari con cui entra in contatto [1,2,4];
- 12-15% di ossido di sodio (Na_2O): questo è ottenuto dalla soda calcica (Na_2CO_3). L'ossido di sodio è unito alla silice per abbassare il punto di fusione del composto a circa 900-1000 °C, nonché per conferire alla miscela la viscosità tipica del vetro [1,2,4];
- 1,5-2% di allumina (Al_2O_3): è un affinanante tipicamente estratto dalle altre materie prime o da materiali alluminosi come il feldspato. Questo è utilizzato per evitare che le reazioni chimiche prodotte all'interno dei forni, dal momento che avvengono a temperatura di fusione, liberino minuscole bollicine con effetti negativi sull'aspetto estetico del prodotto. In alternativa possono essere usati i solfati [1,2,4];
- 0,05-0,25% di ossido di ferro (FeO): costituisce il colorante della miscela. In alternativa possono essere utilizzati degli ossidi metallici come il cromo, il cobalto e i solfuri in grado di pigmentare il vetro. Di particolare importanza è il dosaggio dei solfuri ferrici, dal momento che questi sono tipicamente utilizzati per schermare il vetro dai raggi ultravioletti, responsabili dell'accelerazione dei processi di invecchiamento degli alimenti [2,4].

Infine, può essere unito alla miscela vetrificabile vetro di recupero [1]. In questo caso, la perdita per fusione può variare dal 7% al 15%, a seconda della quantità di vetro riciclato o di scarto (*cullet*) utilizzata, con una minore perdita per fusione all'aumentare della quantità di *cullet* [2] (Figura 11).

Material	Weight (kg)	Oxides Supplied (kg)					LOI ^a (kg)
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	FeO	
Sand SiO ₂	300	299.3	0.2			0.3	0.5
Soda ash Na ₂ CO ₃	100				58.3		41.7
Aragonite CaCO ₃	90			49.0		0.02	40.7
Feldspar (SiO ₂ ·Al ₂ O ₃)	40	26.4	7.6	0.4	1.3	0.03	0.1
Salt cake NaCl	4				2.1		1.9
Cullet	460	333.7	9.2	48.8	67.2	1.03	0.1
Total	994	659.4	17.0	98.2	128.9	1.95	85.0
Yield of glass	909						
Wt% oxides		72.6	1.9	10.8	14.2	0.1	

Source: Adapted from Boyd, D.C. et al., Glass, in: *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 4th edn., Kroschwitz, J. (Ed.), Vol. 12, John Wiley & Sons, New York, pp. 555–628, 1994.

^a Loss on ignition (also referred to as fusion loss).

Figura 11: Formula tipica per un lotto di 1 tonnellata di vetro sodico-calcico per contenitori; Fonte: Gordon L., *Food Packaging: Principles and Practice, Third Edition* [2]

Scegliere la corretta composizione del vetro è, pertanto, uno step fondamentale affinché il vaso abbia le caratteristiche chimiche giuste per garantire la sicurezza e la conservazione degli alimenti.

3.2.2 Le caratteristiche geometriche

In generale, in relazione a un oggetto fisico possono essere specificate due tipologie di caratteristiche geometriche, quelle macroscopiche, che riguardano le proprietà spaziali dell'elemento, e quelle microscopiche, che delineano la texture della superficie dell'oggetto [8].

Per quanto riguarda le caratteristiche macroscopiche, la definizione di opportune tolleranze consente di tenere conto degli errori nella geometria che gli oggetti reali hanno rispetto a quelle ideali, dal momento che la tolleranza geometrica stabilisce lo spazio (area o volume) entro il quale deve trovarsi l'elemento oggetto della tolleranza stessa [9].

Le tolleranze geometriche sono oggetto della norma *BS EN ISO 1101:2017* [9], che ne individua quattro categorie: tolleranze di forma, di orientamento, di localizzazione e di oscillazione:

- Tolleranze di forma: la forma è la configurazione geometrica ideale di un elemento, dalla quale quella reale può deviare in funzione delle tolleranze specificate. In particolare, la forma si può configurare in termini di rettilineità, planarità, rotondità, cilindricità, tolleranza sul profilo lineare e tolleranza sul profilo del piano. In generale, le tolleranze di forma sono “assolute” in quanto non necessitano, per essere definite, di elementi di riferimento.
- Tolleranze di orientamento: definiscono i limiti di variabilità di un elemento geometrico rispetto a un sistema di riferimento. L’orientamento può essere descritto come: parallelismo, perpendicolarità, angolarità, tolleranza sul profilo lineare e tolleranza sul profilo del piano;
- Tolleranze di localizzazione: stabiliscono i limiti di variabilità di un elemento geometrico rispetto ad una localizzazione ideale definita sul disegno, rispetto a uno specifico sistema di riferimento. La localizzazione si configura in termini di: posizione, coassialità, concentricità, simmetria, tolleranza sul profilo lineare e tolleranza sul profilo del piano;
- Tolleranze di oscillazione: definiscono i limiti di variabilità di un elemento geometrico rispetto ad una rotazione attorno ad un asse di riferimento. Tipicamente, le tolleranze di oscillazione, si configurano in run-out di tipo circolare o totale.

Inoltre, lo Standard [9] stabilisce i simboli da utilizzare sui disegni tecnici per indicare ciascuna tipologia di tolleranza geometrica (Figura 12).

In particolare, in relazione allo studio dei vasi in vetro, caratteristiche geometriche macroscopiche di particolare interesse potrebbero essere:

- Il parallelismo bocca-fondo: rappresenta la relazione geometrica per cui il piano della bocca del contenitore risulta parallelo a quello del fondo. Nel caso in cui questo parallelismo non dovesse essere rispettato si osserverà una differenza tra l'altezza massima e minima misurata in punti diversi del contenitore [10];
- La verticalità: secondo la norma *UNI EN 29008:1996* [11], la verticalità è definita come “*lo spostamento orizzontale del centro della bocca rispetto a una linea verticale ideale che attraversa il centro della base*”;

- La planarità della bocca: specifica il grado di uniformità della superficie di tenuta superiore del contenitore indicando quanto questa sia piana e regolare [12];
- L'ovalizzazione del corpo: indica la deviazione della forma del vaso da quella ideale, ovvero cilindrica, verso una forma ellittica o ovale;
- La geometria dell'imboccatura.

Infatti, una corretta determinazione di questi parametri garantirebbe:

- la stabilità del contenitore, riducendo, così, il rischio di ribaltamento;
- una diminuzione della probabilità di rottura del vaso durante l'uso [1];
- l'impilamento: se progettati con pareti parallele i contenitori possono essere facilmente impilati, ottimizzando lo spazio e migliorando l'efficienza durante il trasporto e lo stoccaggio;
- un'adeguata tenuta del prodotto: per esempio, il rispetto di una determinata verticalità delle pareti del contenitore riduce il rischio di fuoriuscita del prodotto.
- Il corretto accoppiamento tra vaso e chiusura;
- La compatibilità del vaso con i macchinari utilizzati per il riempimento o il confezionamento.

Dal punto di vista microscopico, un parametro di particolare interesse è la rugosità superficiale. Questa descrive la deviazione dell'altezza della superficie rispetto a una linea media ideale [13]. Pertanto, il suo valore permette di valutare il livello di irregolarità della superficie di un oggetto. Quindi, il grado di rugosità di una superficiale impatta direttamente sulle prestazioni fisiche e meccaniche della superficie stessa e, di conseguenza, dell'oggetto su cui è stata rilevata.

In relazione ai vasi in vetro, la presenza di difetti superficiali come, per esempio, le micro-crepe, riduce la resistenza dei contenitori, dal momento che questi rappresentano punti di stress vulnerabili per gli impatti che il vaso potrebbe subire durante la manipolazione o sulle linee di imballaggio [1]. Inoltre, una rugosità alta potrebbe facilitare l'accumulo di contaminanti sul contenitore, a causa delle nicchie che vengono a crearsi sulla superficie stessa del prodotto.

Specification	Characteristics	Symbol
Form	Straightness	—
	Flatness	
	Roundness	
	Cylindricity	
	Line profile	
	Surface profile	
Orientation	Parallelism	//
	Perpendicularity	
	Angularity	
	Line profile	
	Surface profile	
Location	Position	
	Concentricity (for centre points)	
	Coaxiality (for median lines)	
	Symmetry	
	Line profile	
	Surface profile	
Run-out	Circular run-out	
	Total run-out	

Figura 12: simboli delle caratteristiche geometriche; BS EN ISO 1101:2017 Geometrical product specifications (GPS) — Geometrical tolerancing — Tolerances of form, orientation, location and run-out, 2020 [9]

3.2.3 Le caratteristiche dimensionali

Le caratteristiche dimensionali rappresentano una componente essenziale nella descrizione di un oggetto fisico, in particolare nel contesto della progettazione e della produzione industriale. Un parametro dimensionale definisce la dimensione lineare o angolare [8] di una caratteristica ideale di un prodotto, come le lunghezze, i diametri, gli spessori o gli angoli, fornendo, così, le specifiche necessarie per garantire che le dimensioni dell'oggetto siano conformi ai requisiti previsti, in modo tale da contribuire alla qualità complessiva del

manufatto. In particolare la dimensione lineare ed angolare possono essere definite nel seguente modo [8]:

- Dimensione lineare: si riferisce alla misura di un oggetto lungo una direzione rettilinea specificando, così, variabili come la lunghezza, la larghezza e l'altezza. Questa dimensione è fondamentale per definire le proporzioni e le misure fisiche di un oggetto;
- Dimensione angolare: descrive l'ampiezza di un angolo presente in un oggetto.

Anche per le caratteristiche dimensionali, come per quelle geometriche, sono di norma specificate delle tolleranze, da evidenziare insieme ai valori nominali mediante un disegno tecnico quotato.

Nello specifico, in relazione ai vasi in vetro per l'uso alimentare, caratteristiche dimensionali di particolare interesse potrebbero essere l'altezza del vaso, il diametro, la dimensione del foro d'inizio, la capacità, lo spessore delle pareti e le caratteristiche dimensionali dell'imboccatura.

In Figura 13 è, pertanto, riportato il disegno tecnico di un vaso in vetro per l'uso alimentare.

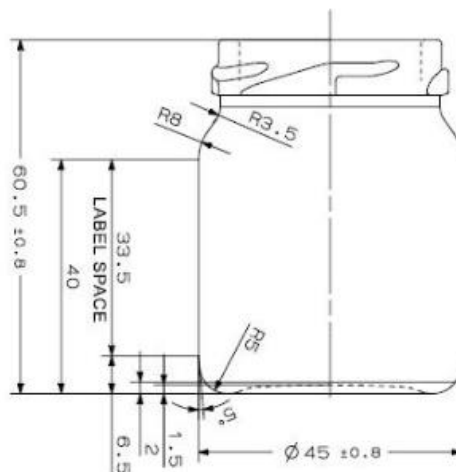


Figura 13: Disegno di un vaso in vetro per uso alimentare, Fonte: EtnaMiele [70]

È ragionevole ipotizzare che una corretta determinazione di questi parametri possa garantire:

- un'adeguata resistenza del vaso, ovvero il soddisfacimento delle proprietà meccaniche;

- un corretto isolamento termico del vaso e, in generale, il soddisfacimento delle proprietà termiche;
- il design complessivo dell'articolo, in funzione delle specifiche e dei requisiti di utilizzo richiesti, tra cui assicurare che all'interno del vaso sia contenuta una quantità adeguata di prodotto e che l'alimento non fuoriesca.

3.2.4 Le proprietà meccaniche e termiche

Le proprietà meccaniche di un materiale descrivono il suo comportamento quando è sottoposto a forze esterne come trazione, compressione o torsione, determinando, così, la capacità del materiale stesso di sopportare deformazioni, fratture o rotture. Le caratteristiche meccaniche includono, quindi, la resistenza a compressione, trazione, a flessione, la resistenza superficiale, la resistenza all'urto, la resistenza allo scorrimento viscoso e la resistenza a fatica [14].

Tuttavia, in relazione ai vasi in vetro per l'uso alimentare, di particolare interesse sono la resistenza all'urto e la resistenza al carico assiale, dal momento che il vetro è un materiale tipicamente fragile e che i contenitori sono sottoposti a continue sollecitazioni durante tutto il loro ciclo vita [2]. La resistenza alla pressione interna è, tipicamente, monitorata per le bottiglie destinate a contenere bevande gassate e per i contenitori trattati in acqua bollente o in acqua calda pressurizzata [2].

La resistenza al carico assiale è la capacità di un elemento di sostenere forze applicate lungo il suo asse longitudinale [14]. Nello specifico, il monitoraggio di questo parametro è di interesse poiché i vasi possono essere sottoposti a frequenti carichi assiali, come quelli provocati dal sollevamento, dallo stoccaggio in scaffali o dalla pallettizzazione dell'articolo dovuta al trasporto.

La resistenza all'urto è la capacità di un elemento di assorbire energia e resistere a impatti o forze improvvise senza subire rotture o deformazioni significative [14]. Pertanto, tale proprietà è fondamentale per valutare la durabilità e la robustezza di materiali e strutture sottoposti a sollecitazioni dinamiche. Anche in questo caso, il suo monitoraggio è fondamentale per garantire la durabilità del vaso.

Per quanto riguarda le proprietà termiche dei materiali, queste descrivono il comportamento di un determinato elemento a temperature elevate o a variazioni di temperatura. Quindi, le

caratteristiche termiche includono la capacità termica, la conducibilità termica, la dilatazione termica e la resistenza agli sbalzi termici [14]. Tra queste, è proprio la resistenza agli shock termici ad essere oggetto di studio per i vasi in vetro per l'uso alimentare.

La resistenza agli sbalzi termici è la capacità di un materiale di tollerare rapidi cambiamenti di temperatura senza subire danni, deformazioni o fratture [14]. Questa caratteristica è particolarmente rilevante per i materiali esposti a variazioni termiche improvvise, come il vetro dei vasi destinati al confezionamento alimentare, in quanto soggetti a continue sollecitazioni termiche, sia durante il processo produttivo sia durante il riempimento che il trasporto [2].

4. Analisi della normativa

Grazie alle sue proprietà chimico-fisiche, tra cui la capacità di prevenire alterazioni organolettiche nei cibi e bevande, il vetro è considerato uno dei materiali più sicuri per il confezionamento alimentare. Tuttavia, ciò non basta per garantire la salubrità e la sicurezza degli alimenti e, di conseguenza, dei consumatori. In relazione ai contenitori destinati al contatto con gli alimenti esiste, infatti, un'ampia normativa che ne disciplina aspetti come la composizione, le caratteristiche meccaniche, dimensionali e geometriche, nonché il rilascio di sostanze contaminanti.

Secondo *Robertson* [2] tali provvedimenti sono presi tenendo in considerazione molteplici fattori:

1. La stabilità dell'alimento rispetto alle reazioni chimiche, biochimiche e microbiologiche che possono causarne il deterioramento. La velocità di tali reazioni dipende da fattori sia intrinseci (legati alla composizione dell'alimento) sia estrinseci (legati alle condizioni ambientali);
2. Le condizioni ambientali a cui l'alimento è esposto durante la distribuzione e lo stoccaggio, tra cui la temperatura e l'umidità, determinano le caratteristiche di barriera necessarie per l'imballaggio;
3. La compatibilità dell'imballaggio con il metodo di conservazione scelto: per esempio, se l'alimento subisce un trattamento termico dopo il confezionamento, l'imballaggio deve essere in grado di resistere a tale processo. Analogamente, se l'alimento sarà conservato a temperature di congelamento, l'imballaggio dovrà essere adattato a queste condizioni.
4. La composizione e le caratteristiche del materiale di imballaggio: queste possono incidere sulla qualità e sicurezza dell'alimento confezionato, a causa della possibile migrazione di sostanze dall'imballaggio all'alimento.

Nel seguente capitolo sono, pertanto, illustrate le norme di riferimento per i contenitori in vetro per l'uso alimentare, con particolare interesse verso gli Standard tecnici, seppur non sia esclusa una panoramica della normativa europea, americana ed italiana che attualmente disciplinano il mercato del packaging a uso agro-alimentare.

4.1I Regolamenti europei

All'interno dell'UE la legislazione alimentare è classificata in Direttive verticali, che riguardano un gruppo specifico di prodotti simili, e Direttive orizzontali, che trattano argomenti di applicazione generale a tutti gli alimenti (per esempio gli additivi, i materiali destinati a venire a contatto con gli alimenti, i metodi di controllo, ecc.). Nello specifico, per agevolare la libera circolazione delle merci, la Commissione europea ha deciso di prediligere l'omologazione dei settori orizzontali.

Pertanto, nel contesto dell'Unione Europea, i principali Regolamenti che riguardano i materiali e gli oggetti destinati al contatto con gli alimenti sono:

- *Il Regolamento (CE) n.2023/2006* [15]: stabilisce i requisiti per le Buone Pratiche di Fabbricazione (GMP) dei materiali destinati al contatto con alimenti. Obiettivo di questo regolamento è, quindi, prevenire i difetti nei contenitori, come la fragilità strutturale o la presenza di impurità. In particolare, è richiesto che i contenitori in vetro siano sottoposti a procedure di sterilizzazione, mediante il trattamento termico o l'uso di sostanze chimiche approvate, per garantire che non vi siano residui microbiologici e che le aziende produttrici implementino un sistema di gestione della sicurezza alimentare conforme ai requisiti del *Regolamento CE 852/2004* [16] relativo all'igiene degli alimenti;
- *Il Regolamento (CE) n.1935/2004* [17]: applicabile a una vasta gamma di materiali, vetro incluso, stabilisce i requisiti generali per garantire la salubrità dei materiali destinati al packaging alimentare e la non alterazione delle caratteristiche sensoriali degli alimenti. Nello specifico, questo regolamento impone che i contenitori in vetro non rilascino sostanze tossiche o nocive negli alimenti in quantità tali da rappresentare un pericolo per la salute umana, che non alterino la composizione chimica, fisica o organolettica (sapore, odore, colore) degli alimenti e che non influenzino negativamente la qualità o la sicurezza dell'alimento durante la sua conservazione;
- *Il Regolamento (CE) n.1907/2006*: noto come *REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals)* [18], disciplina la produzione e l'uso delle sostanze chimiche, con l'obiettivo di salvaguardare la salute umana e l'ambiente dai rischi derivanti dall'utilizzo delle sostanze chimiche. Uno degli obiettivi principali del Regolamento è quello di imporre la registrazione delle sostanze chimiche da parte delle aziende produttrici, ovvero di fornire informazioni dettagliate

sulle proprietà chimico-fisiche, tossicologiche ed ecotossicologiche della sostanza, nonché sugli usi previsti e le misure di gestione dei rischi.

4.2 La normativa statunitense

Negli Stati Uniti, la regolamentazione relativa ai materiali che possono entrare in contatto con gli alimenti, inclusi i contenitori di vetro, è di competenza della *Food and Drug Administration (FDA)* ed è delineata nel *Code of Federal Regulations (CFR) Title 21* [19]. In particolare, il Titolo 21 comprende regolamenti generali volti ad applicare il “*Federal Food, Drug and Cosmetic Act*” [20] e il “*Fair Packaging and Labeling Act*” [21] i cui punti chiave riguardano il monitoraggio e alla gestione della sicurezza alimentare, le norme per gli additivi alimentari e i requisiti per le migrazioni di sostanze chimiche negli alimenti.

4.3 La normativa italiana

In Italia, quando si parla di normativa relativa al packaging alimentare si fa sostanzialmente riferimento ad attuazioni nazionali di direttive europee. Di particolare interesse sono il *D.M.S. 26/04/1993* [22], con le successive integrazioni, e il *D.L. n.29 del 10/02/2017* [23] che, in riferimento agli imballaggi, ai recipienti e agli utensili destinati al contatto con le sostanze alimentari, non solo ne stabiliscono i più generici requisiti igienico-sanitari, ma anche i requisiti specifici come i test di migrazione, le procedure di controllo e la tracciabilità. È, quindi, specificato che, in relazione ai *MOCA (Materiali e Oggetti a Contatto con gli Alimenti)*, i produttori debbano registrarsi presso il Ministero della Salute e garantire che i processi produttivi rispettino le normative igienico-sanitarie.

4.4 Gli Standard tecnici

Diversamente dalla normativa precedentemente esaminata, tra gli standard tecnici esistono norme specifiche per i contenitori in vetro. Queste si focalizzano su aspetti geometrici, dimensionali e meccanici dei contenitori, specificandone le tolleranze standard e individuando i metodi di prova con cui testarne alcune delle proprietà. In particolare, nei prossimi sottoparagrafi saranno illustrate le seguenti norme:

- *BS ISO 9058:2008 Glass containers — Standard tolerances for bottles* [24];

- *BS EN ISO 8113:2004 Glass containers — Resistance to vertical load — Test method* [25];
- *BS EN ISO 7459:2004 Glass containers — Thermal shock resistance and thermal shock endurance — Test methods* [26];
- *BS EN ISO 8106:2004 Glass containers — Determination of capacity by gravimetric method — Test method* [27];
- *BS EN 12980:2000 Materials and articles in contact with foodstuffs — Non-metallic articles for catering and industrial use — Method of test for the determination of impact resistance* [28];
- *UNI 9302:1988 Contenitori di vetro — Determinazione della resistenza all'urto* [29];
- *UNI EN 29885:1996 Contenitori di vetro a bocca larga — Scostamento dalla planarità della superficie di tenuta superiore — Metodi di prova* [12];
- *UNI EN 29009:1996 Contenitori di vetro — Altezza e non parallelismo della bocca con riferimento alla base del contenitore — Metodi di prova* [10];
- *UNI EN 29008:1996 Bottiglie di vetro — Verticalità — Metodo di prova* [11];
- *ASTM C149 – 14 Standard Test Method for Thermal Shock Resistance of Glass Containers* [30];
- *ASTM C224 – 78 Standard Practice for Sampling Glass Containers* [31].

4.4.1 BS ISO 9058:2008 Glass containers — Standard tolerances for bottles

Basata sulla scheda tecnica DT 2 (1996) del *CE.T.I.E*¹ [32] e sulla Direttiva del Consiglio dell'UE 75/107/EEC [33], lo Standard internazionale *BS ISO 9058:2008* [24] specifica le tolleranze per le bottiglie di vetro a sezione circolare e capacità nominale da 50 a 5000 ml, nello specifico, in riferimento a capacità, altezza, diametro, verticalità e non-parallelismo con riferimento alla base del contenitore.

Per quanto riguarda l'errore sulla capacità, le tolleranze del contenitore devono essere conformi ai valori specificati in Tabella 1, con l'accortezza che la capacità raso-bocca² e la capacità nominale abbiano il medesimo errore massimo ammissibile [24].

¹ Centre technique international de l'embouteillage et du conditionnement.

² Con capacità raso bocca si intende il volume massimo di liquido che un contenitore, come una bottiglia o un vaso, può contenere quando è riempito fino al bordo superiore, senza traboccare.

Tabella 1: tolleranze di capacità; BS ISO 9058:2008 Glass containers — Standard tolerances for bottles

Capacità nominale V_n [ml]	Errore massimo ammissibile sulla capacità effettiva	
	% di V_n	[ml]
$50 < V_n \leq 100$		3
$100 < V_n \leq 200$	3	
$200 < V_n \leq 300$		6
$300 < V_n \leq 500$	2	
$500 < V_n \leq 1000$		10
$1000 < V_n \leq 5000$	1	

La tolleranza sull'altezza nominale, espressa in mm, dovrebbe essere calcolata utilizzando la seguente formula [24]:

$$T_H = \pm (0,6 + 0,004H)$$

(4.4.1)

dove H indica l'altezza nominale in mm.

Similmente, per definire la tolleranza del diametro principale del corpo, espressa anch'essa in mm, dovrebbe essere utilizzata la seguente formula, ove D indica il valore nominale del diametro principale del corpo [24]:

$$T_D = \pm (0,5 + 0,012D)$$

(4.4.2)

Per quanto riguarda la tolleranza di verticalità, invece, essa è determinata a partire dall'altezza nominale del contenitore.

Detta T_v la tolleranza di verticalità [24]:

- Per contenitori la cui altezza nominale è al più 120 mm:

$$T_V = 1,5 \text{ mm}$$

(4.4.3)

- Per contenitori con altezza nominale (H) superiore a 120 mm:

$$T_V = 0,3 + 0,01H$$

(4.4.4)

Infine, la tolleranza sul non parallelismo della finitura rispetto alla base del contenitore (anche nota come “inclinazione della finitura”) deve essere conforme ai valori presenti in Tabella 2 [24].

Tabella 2: tolleranze sul non parallelismo della finitura rispetto alla base del contenitore; BS ISO 9058:2008 Glass containers — Standard tolerances for bottles

Diametro nominale della finitura [mm]	Tolleranza [mm]
≤ 20	0,45
> 20 ≤ 30	0,6
> 30 ≤ 40	0,7
> 40 ≤ 50	0,8
> 50 ≤ 60	0,9
> 60	1

4.4.2 BS EN ISO 8113:2004 Glass containers — Resistance to vertical load — Test method

La norma europea BS EN ISO 8113:2004 [25] ha l’obiettivo di specificare un metodo per la determinazione della resistenza al carico assiale per i contenitori in vetro.

Lo Standard stabilisce, quindi, che il campione di contenitori da sottoporre alla prova meccanica debba essere individuato a partire da una selezione di contenitori che non sono stati in precedenza oggetto di test meccanici o termici, dal momento che questi potrebbero alterarne la resistenza e, di conseguenza, falsare i risultati del test [25].

Per quanto riguarda l’apparecchiatura da utilizzare, la norma non identifica uno specifico apparecchio, ma individua le caratteristiche degli strumenti coinvolti nella prova. Pertanto, la pressa o lo strumento equivalente [25]:

- Dovrà essere in grado di sviluppare la forza necessaria per condurre il test e di indicare tale forza con un’accuratezza di almeno il 2,5%;
- Dovrebbe consistere in due piastre di acciaio orizzontali, di cui la superiore auto allineante e quella inferiore fornita di cerchi concentrici sulla superficie;
- Dovrebbe essere equipaggiato di un coperchio protettivo. In alternativa, andrebbe utilizzata una copertura cilindrica con altezza leggermente inferiore a quella del campione, per ogni tipo di contenitore oggetto del test.

Come riporta lo Standard, è, inoltre, consigliato l'utilizzo di opportune imbottiture, come fogli di plastica o gomma, carta o cartone piegati, per prevenire il contatto tra la superficie del vetro e le facce pressorie in metallo dell'apparecchio [25].

Una volta individuato il campione e l'apparecchiatura da utilizzare per il test è, quindi, possibile dare inizio alla prova. La procedura è così articolata [25]:

1. Portare il campione a una temperatura tale che la differenza rispetto a quella ambiente sia al più di 5°C;
2. Eliminare eventuali particelle di vetro presenti sul piatto dell'apparecchio e posizionare un cuscinetto di base con sopra il contenitore del test al centro della piastra inferiore (la linea centrale del contenitore deve essere in linea con quella dell'apparecchio);
3. Fissare il contenitore utilizzando il coperchio protettivo e posizionare la corrispondente chiusura sulla superficie di tenuta della finitura del contenitore, se previsto per la prova. Il contenitore oggetto della prova dovrà, quindi, essere coperto con un'imbottitura simile a quella utilizzata come base per il contenitore, a meno che non venga utilizzata una chiusura. Laddove utilizzate, le imbottiture o la chiusura dovranno essere sostituite per ogni contenitore testato;
4. Monitorare la velocità di avvicinamento delle piastre o del tasso medio di aumento della forza, che devono essere costanti;

A questo punto, in base al tipo di test per cui si è optato, la procedura potrà proseguire in uno dei seguenti modi [25]:

- a) *Test di superamento*: si aumenta la forza applicata fino al raggiungimento del valore specificato. Quando viene raggiunto il valore specificato, le piastre devono essere ritirate. Dopo aver testato un numero predeterminato di contenitori, il test si considera concluso;
- b) *Test progressivo totale*: si aumenta progressivamente la forza applicata fino alla rottura del contenitore. La prova deve essere applicata a tutti i contenitori del campione.

All'interno del test report dovranno quindi essere riportate, per ciascun tipo di prova condotta, le informazioni riassunte in Tabella 3 [25].

Tabella 3: informazioni contenute nel test report; BS EN ISO 8113:2004 Glass containers — Resistance to vertical load — Test method

<i>Test di superamento</i>	<i>Test progressivo totale</i>
Riferimento alla norma BS EN ISO 8113:2004	Riferimento alla norma BS EN ISO 8113:2004
Descrizione e capacità dell'apparecchio e condizioni della prova	Descrizione e capacità dell'apparecchio e condizioni della prova
Descrizione e numero dei contenitori che formano il campione testato; descrizione del metodo di campionamento utilizzato	Descrizione e numero dei contenitori che formano il campione testato; descrizione del metodo di campionamento utilizzato
Caratteristiche delle imbottiture/chiusure utilizzate, se utilizzate	Caratteristiche delle imbottiture/chiusure utilizzate, se utilizzate
Valore della velocità di avvicinamento o tasso medio di aumento della forza	Valore della velocità di avvicinamento o tasso medio di aumento della forza
Forza raggiunta (carico), numero di contenitori che non hanno superato il test	forza, espressa in kN, necessaria per rompere ciascun contenitore, valore medio di questi valori (x) e relativa deviazione standard (s).
Data e luogo della prova	Data e luogo della prova
Firma del responsabile	Firma del responsabile

4.4.3 BS EN ISO 7459:2004 Glass containers — Thermal shock resistance and thermal shock endurance — Test methods

La norma europea BS EN ISO 7459:2004 [26] specifica i metodi di prova per determinare la resistenza³ e la durata⁴ agli shock termici dei contenitori in vetro. Anche in questo caso, come per la norma precedentemente illustrata, i contenitori utilizzati per la prova non devono essere stati sottoposti ad altre procedure di prova meccaniche o termiche. Inoltre, i campioni devono essere selezionati in modo tale da fornire tutte le informazioni richieste per il test e la prova deve essere eseguita su un numero predeterminato di contenitori.

L'apparecchiatura per condurre la prova consiste in [26]:

- Bagno d'acqua fredda: consiste in un bagno o un serbatoio in grado di contenere almeno 8 dm³ di acqua per ogni chilogrammo di vetro sottoposto a prova in una volta. Questo deve essere equipaggiato di un circolatore dell'acqua, di un'unità di controllo della temperatura e di un controllo termostatico in grado di mantenere la temperatura dell'acqua entro ± 1 °C da una temperatura inferiore specificata, t_2 , nell'intervallo di (22 ± 5) °C.

³ Con resistenza allo shock termico si intende il valore dello shock termico, misurato in °C, che un contenitore è in grado di sopportare senza rompersi.

⁴ Con durata allo shock termico si intende il valore interpolato della resistenza allo shock termico al quale è ragionevole presumere che il 50% dei contenitori fallirà la prova.

- Bagno d'acqua calda: Comprende un bagno o un serbatoio in grado di contenere almeno 8 dm³ di acqua per ogni chilogrammo di vetro sottoposto a prova in una volta. Questo deve essere equipaggiato di un circolatore dell'acqua, di un'unità di controllo della temperatura e di un riscaldatore termostatico in grado di mantenere la temperatura dell'acqua entro ± 1 °C da una temperatura superiore specificata, t1.
- Cestello: è realizzato o rivestito con un materiale inerte che consente di non danneggiare i contenitori durante la prova. In particolare, il cestello deve essere in grado di tenere ciascun contenitore in posizione verticale, l'uno separato dall'altro, e deve essere dotato di un coperchio perforato per impedire che i contenitori galleggino una volta immersi nei bagni. Può essere combinato con un dispositivo automatico in grado di immergerlo nel bagno caldo e, successivamente, di trasferirlo nel bagno freddo.

Una volta individuato il campione e l'apparecchiatura da utilizzare per il test è, quindi, possibile dare inizio alla prova. Per quanto riguarda la determinazione della resistenza allo shock termico, la procedura è così articolata [26]:

1. Riempire il bagno freddo con acqua fino a un volume pari ad almeno 8 dm³ per ogni chilogrammo di vetro da testare, in modo tale che i contenitori restino completamente sommersi e che la superficie della loro finitura sia almeno 50 mm al di sotto del pelo dell'acqua. Quindi, regolare la temperatura dell'acqua entro ± 1 °C dalla temperatura inferiore specificata, t2.
2. Preparare il bagno caldo seguendo le stesse istruzioni previste per il bagno freddo, quindi riscaldare l'acqua e mantenere la temperatura stabile entro ± 1 °C dalla temperatura massima indicata, t1.
3. Posizionare i contenitori vuoti nel cestello, chiudere il coperchio e immergerlo nel bagno caldo. Se necessario, regolare il controllo del calore per mantenere la temperatura del bagno stabile, entro ± 1 °C dalla temperatura superiore specificata, t1, e mantenere i contenitori immersi a questa temperatura per almeno 5 minuti.
4. Trasferire il cestello con i contenitori riempiti, meccanicamente o manualmente, dal bagno caldo al bagno freddo entro un massimo di 16 secondi, assicurandosi che i contenitori siano completamente immersi. Mantenere i contenitori nel bagno freddo per 30 secondi, quindi rimuovere il cestello con i contenitori dal bagno.

5. Nel minor tempo possibile, determinare il numero di contenitori che non hanno superato il test, ispezionandoli singolarmente per verificare la presenza di crepe o rotture.

A questo punto, in base al tipo di test per cui si è optato, la procedura potrà proseguire in uno dei seguenti modi [26]:

- a) *Test di superamento*: se il campione testato non presenta un numero di crepe o rotture superiore a quello concordato, il test si considera superato con il differenziale di temperatura $t_1 - t_2$ stabilito.
- b) *Prova progressiva ad una percentuale specificata di rotture*: i contenitori che superano il test iniziale devono essere sottoposti a prove successive con incrementi progressivi di $t_1 - t_2$, fino a quando una percentuale stabilita di contenitori non fallisce il test. Solitamente, la differenza di temperatura tra t_2 e t_1 aumenta in passi di 5 °C.
- c) *Prova progressiva totale*: i contenitori che superano la *prova progressiva (b)* devono continuare ad essere testati finché tutti non falliscono la prova. Se la prova non è completata quando la temperatura del bagno caldo raggiunge i 95 °C, il test deve essere ripetuto abbassando la temperatura del bagno freddo.
- d) *Test di alto livello*: i contenitori devono essere testati con un differenziale di temperatura $t_1 - t_2$ tale da provocare il fallimento di una percentuale concordata di contenitori in una singola prova.

Per quanto riguarda la determinazione della durata allo shock termico, i contenitori devono essere testati in conformità a quanto specificato per la *Prova progressiva totale*. Fondamentale è, dunque, registrare il numero di guasti occorsi a ciascuna differenza di temperatura. A partire da questa informazione sarà, infatti, possibile determinare la durata allo shock termico. In particolare, questa è determinata mediante un grafico che mette a confronto la percentuale cumulativa dei guasti con la differenza di temperatura alla quale i contenitori si sono guastati [26].

All'interno del test report dovranno quindi essere riportate, per ciascun tipo di prova condotta, le informazioni riassunte in Tabella 4 [26].

Tabella 4: informazioni contenute nel test report; BS EN ISO 7459:2004 Glass containers — Thermal shock resistance and thermal shock endurance — Test methods

<i>Test di superamento</i>	<i>Prova progressiva ad una percentuale specificata di rotture</i>	<i>Prova progressiva totale</i>	<i>Test di alto livello</i>
Riferimento alla norma BS EN ISO 7459:2004	Riferimento alla norma BS EN ISO 7459:2004	Riferimento alla norma BS EN ISO 7459:2004	Riferimento alla norma BS EN ISO 7459:2004
Numero dei contenitori che formano il campione testato; descrizione del metodo di campionamento utilizzato	Numero dei contenitori che formano il campione testato; descrizione del metodo di campionamento utilizzato	Numero dei contenitori che formano il campione testato; descrizione del metodo di campionamento utilizzato	Numero dei contenitori che formano il campione testato; descrizione del metodo di campionamento utilizzato
Temperatura del bagno freddo	Temperatura del bagno freddo	Temperatura del bagno freddo	Temperatura del bagno freddo
Differenza di temperatura $t_1 - t_2$; numero di contenitori che non hanno superato il test; limite di specifica e se i campioni hanno superato il test	Differenza di temperatura più elevata, $t_1 - t_2$, alla quale non si è verificato alcun guasto; numero di contenitori che si sono guastati a ogni differenza di temperatura; differenza di temperatura necessaria per raggiungere la percentuale predeterminata di guasti, espressa al passo di incremento più vicino	differenze di temperatura utilizzate nel test; numero di contenitori che si sono guastati a ogni differenza di temperatura; differenza di temperatura media alla quale si verifica il guasto	<i>Differenza di temperatura utilizzata nel test; percentuale di contenitori che hanno ceduto a quella differenza di temperatura</i>
Data e luogo della prova	Data e luogo della prova	Data e luogo della prova	Data e luogo della prova
Firma del responsabile	Firma del responsabile	Firma del responsabile	Firma del responsabile

4.4.4 BS EN ISO 8106:2004 Glass containers — Determination of capacity by gravimetric method — Test method;

Lo standard europeo BS EN ISO 8106:2004 [27] specifica un metodo gravimetrico per la determinazione delle capacità raso bocca e a livello di riempimento dei contenitori in vetro e per la verifica della loro conformità rispetto ai limiti di specifica.

La capacità del contenitore di vetro oggetto della prova è determinata a partire dalla massa dell'acqua usata per il riempimento del contenitore stesso, applicando un fattore di correzione che tiene conto della temperatura e della densità dell'acqua. In particolare, la capacità del contenitore dovrà essere calcolata per differenza fra il valore della massa del contenitore riempito e quella del contenitore vuoto e dovrà essere espressa come volume in millilitri [27].

Anche in questo caso la prova deve essere effettuata su un numero predeterminato di contenitori rappresentativi del lotto.

L'apparecchiatura include [27]:

- Termometri generali con scala graduata avente divisioni di almeno 1°C;
- Bilancia con un'accuratezza di misura secondo quanto indicato in Figura 14;
- Piastra per misurare il livello di riempimento raso bocca dei contenitori a bocca larga;
- Calibro di profondità per misurare il livello di riempimento.

La procedura del test è così articolata [27]:

1. Monitorare la temperatura ambiente mantenendola nel range $22 \pm 5^\circ\text{C}$;
2. Monitorare la temperatura dell'acqua mantenendola entro $\pm 1^\circ\text{C}$ dal primo valore misurato, per tutta la prova;
3. Determinare il peso del contenitore asciutto e vuoto, a temperatura ambiente, con una tolleranza di $\pm 1^\circ\text{C}$;
4. Posizionare il contenitore su una superficie orizzontale piana e riempirlo fino a poco prima, ma il più vicino possibile, al livello di riempimento. La superficie esterna del contenitore deve rimanere asciutta per tutta la durata della prova;
5. Per determinare la capacità raso bocca, il contenitore deve essere riempito fino al bordo con acqua, in modo che la sommità del menisco sia a livello con il bordo del contenitore. Per i contenitori a bocca larga è raccomandato l'uso della piastra, al di sotto della quale non deve essere presente alcuna bolla d'aria;
6. Per la determinazione della capacità a livello di riempimento, è necessario inserire nel collo del contenitore il calibro di profondità, mantenendolo centrato e verticale. Il contenitore deve essere riempito d'acqua fino a quando il punto centrale del menisco non raggiunga esattamente la punta del calibro;
7. Pesare il contenitore con l'accuratezza specificata in Figura 14.

Capacità ml	Accuratezza della misurazione g
fino a 10	± 0,2
oltre 10 fino a 250	± 0,5
oltre 250 fino a 1 000	± 1
oltre 1 000 fino a 5 000	± 2,5
oltre 5 000	± 10

Figura 14: precisione richiesta per la determinazione della capacità di un contenitore con metodo gravimetrico. Fonte: BS EN ISO 8106:2004 Glass containers — Determination of capacity by gravimetric method — Test method [27]

Una volta determinata la capacità del contenitore, sarà necessario calcolare la capacità reale (CR) mediante la seguente equazione [27]:

$$CR = m \times VCF$$

(4.4.5)

Dove m è la massa d'acqua espressa in grammi e VCF è il fattore di correzione del volume per l'acqua alla temperatura di prova in ml/g. Per ciascuna temperatura dell'intervallo consentito dal test, la Figura 15 fornisce i fattori di correzione del volume per l'acqua distillata⁵.

Test temperature (°C)	Volume correction factor VCF (ml/g)
16	1,001 02
17	1,001 23
18	1,001 41
19	1,001 60
20	1,001 80
21	1,002 01
22	1,002 23
23	1,002 47
24	1,002 71
25	1,002 96
26	1,003 23
27	1,003 50
28	1,003 78

Figura 15: fattori di correzione per l'acqua distillata a 1 bar. Fonte: BS EN ISO 8106:2004 Glass containers — Determination of capacity by gravimetric method — Test method [27]

⁵ Nella pratica, è spesso utilizzata l'acqua di rubinetto anziché quella distillata. In questo caso è, quindi, necessario applicare fattori di correzione aggiuntivi.

All'interno del test report dovranno quindi essere riportate, per ciascun tipo di prova condotta, le informazioni riassunte in Tabella 5 [27].

Tabella 5: informazioni contenute nel test report; BS EN ISO 8106:2004 Glass containers — Determination of capacity by gravimetric method — Test method

Riferimento alla norma BS EN ISO 8106:2004
Numero dei contenitori che formano il campione testato; descrizione del metodo di campionamento utilizzato
La misura della capacità a livello di riempimento massimo di ciascun contenitore.
Identificazione dei contenitori che non soddisfano il limite di specifica,
La capacità totale, se richiesta dalla specifica del contenitore, calcolata come media delle capacità individuali del numero predeterminato di contenitori di prova.
Un calcolo per verificare se il campione rispetta i criteri di accettazione
Data e luogo della prova
Firma del responsabile

4.4.5 BS EN 12980:2000 Materials and articles in contact with foodstuffs — Non-metallic articles for catering and industrial use — Method of test for the determination of impact resistance

Lo standard europeo BS EN 12980:2000 [28] illustra un metodo di prova per la determinazione della resistenza all'impatto degli articoli utilizzati nel catering e nei servizi industriali a contatto con gli alimenti, compresi i contenitori per la cottura e il trasporto degli alimenti stessi.

In particolare, il test utilizza una macchina per prove d'impatto in cui l'articolo da testare è colpito da un martello montato all'estremità di un pendolo di massa trascurabile. Il pendolo è sollevato fino a un angolo prestabilito rispetto alla verticale e poi lasciato cadere per colpire l'oggetto. Pertanto, l'apparecchio deve essere costituito da (Figura 16) [28]:

- Un pendolo che oscilla orizzontalmente, composto da un braccio rigido in metallo leggero con un raggio di oscillazione variabile tra 0,2 e 0,7 m, e da un martello la cui massa può variare tra 0,1 e 1 kg, rappresentando la maggior parte della massa complessiva del sistema. La testa del martello è intercambiabile, generalmente sferica, e realizzata in acciaio con durezza compresa tra 55 e 65 HRC;
- Un dispositivo (opzionale) per sollevare il pendolo fino all'altezza desiderata e rilasciarlo per l'impatto;

- Un quadrante per misurare lo scostamento angolare del pendolo dalla verticale e/o la relativa altezza di caduta (h) e l'energia d'impatto (E);
- Una colonna di supporto per sostenere il pendolo e il quadrante;
- Un supporto regolabile per posizionare il campione di prova sull'apparecchiatura, in grado di regolarne posizione orizzontale e verticale, nonché di inclinarlo;
- Un fermo a forma di V con un angolo di 120° che impedisca al campione di prova di spostarsi durante l'impatto;
- Uno schermo protettivo contro eventuali schegge;
- Una base stabile su cui sono montate le componenti della macchina del test. Per garantire ciò il macchinario è, tipicamente, fissato al pavimento.

Una volta selezionato il campione rappresentativo, la cui dimensione deve essere di almeno dieci unità, la prova procede nel seguente modo [28]:

1. Posizionare il campione di prova sull'apparecchio in modo tale che il martello in posizione di riposo tocchi il punto desiderato per l'impatto e che il campione di prova tocchi il fermo;
2. Chiudere lo schermo protettivo e sollevare il pendolo all'altezza corrispondente all'energia d'impatto richiesta;
3. Rilasciare il pendolo;
4. Esaminare il campione testato;
5. Registrare i risultati. Il test è considerato superato se il campione non si è rotto, non mostra segni visibili di scheggiature, rotture o fessurazioni.

Terminata la prova sulla prima unità, le successive possono essere testate seguendo la logica per attributi o per variabili, a seconda degli obiettivi del test [28]:

- a) *Test per attributi*: si posiziona un altro campione sul supporto e si ripete la prova con le stesse modalità della precedente;
- b) *Test per variabili*: si ripete il test sullo stesso campione aumentando gradualmente l'energia fino alla comparsa di segni d'urto o fino a raggiungere un'energia target. In alternativa, si può ripetere la procedura senza cambiare il livello di energia, ma colpendo più volte il medesimo campione sullo stesso punto o in punti differenti.

All'interno del test report dovranno quindi essere riportate, per ciascun tipo di prova condotta, le informazioni riassunte in Tabella 6 [28].

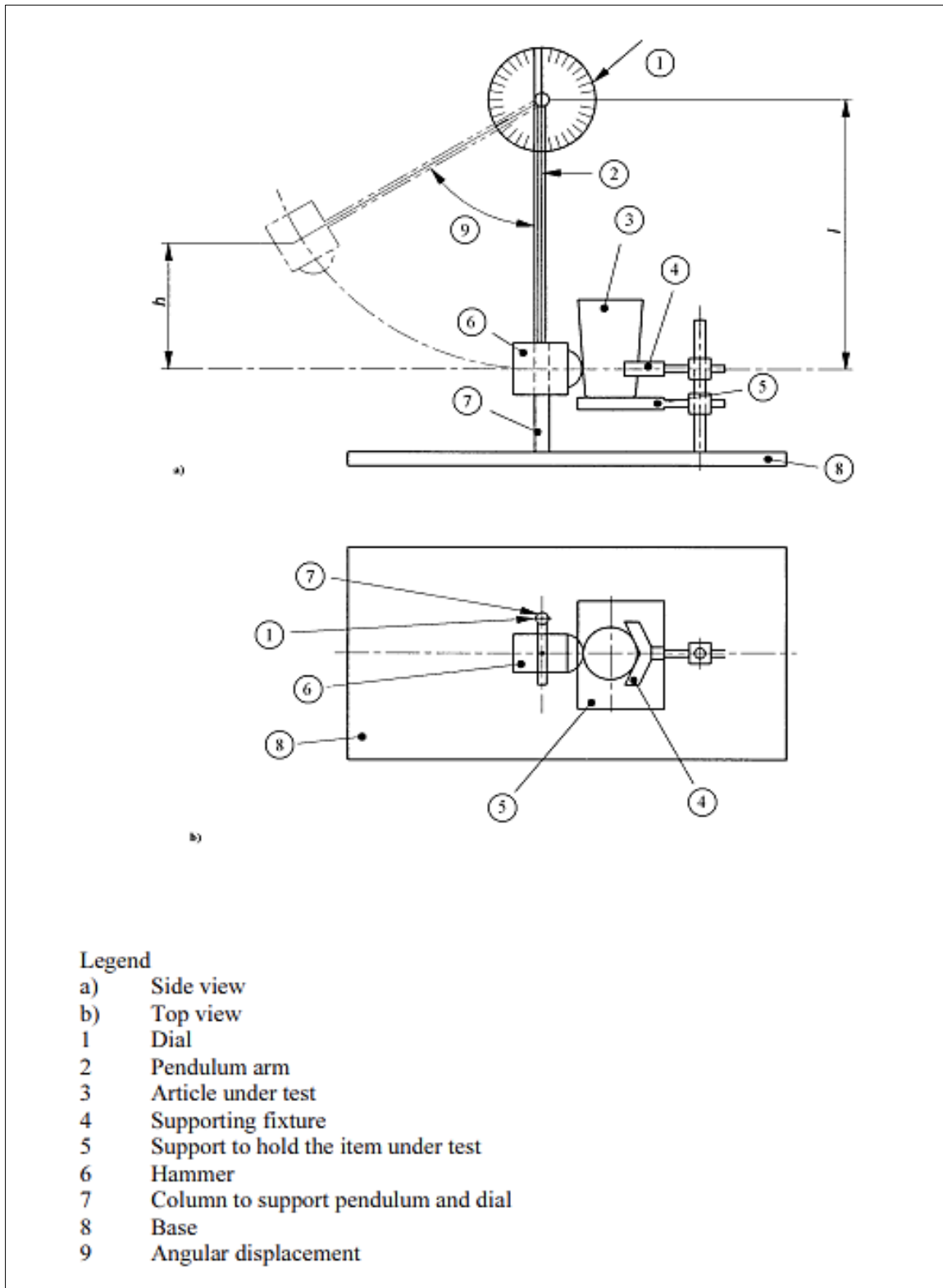


Figura 16: macchina per prova d'impatto. Fonte: BS EN 12980:2000 Materials and articles in contact with foodstuffs — Non-metallic articles for catering and industrial use — Method of test for the determination of impact resistance [28]

Tabella 6: informazioni contenute nel test report; BS EN 12980:2000 *Materials and articles in contact with foodstuffs — Non-metallic articles for catering and industrial use — Method of test for the determination of impact resistance*

<i>Test per attributi</i>	<i>Test per variabili</i>
Descrizione dell'articolo oggetto del test	Descrizione dell'articolo oggetto del test
Il numero di articoli nel lotto testato	Il numero di articoli nel lotto testato
Il piano di campionamento utilizzato e le procedure per selezionare i campioni di prova dal lotto	Il piano di campionamento utilizzato e le procedure per selezionare i campioni di prova dal lotto
Il numero degli articoli testati	Il numero degli articoli testati
Le condizioni del test nel dettaglio (temperatura, massa della testa del martello, altezza di caduta, energia d'impatto, punta e angolo di impatto ecc.)	Le condizioni del test nel dettaglio (temperatura, massa della testa del martello, altezza di caduta, energia d'impatto, punta e angolo di impatto ecc.)
Il numero di articoli rotti o danneggiati e la relativa energia	Il livello di energia iniziale e i successivi, se applicabile, e i valori di energia e l'altezza di caduta a cui i campioni si rompono o si danneggiano; in alternativa il numero di punti d'impatto.
	Valore medio e variabilità dei risultati
Altri dettagli rilevanti	Altri dettagli rilevanti

4.4.6 UNI 9302:1988 Contenitori in vetro — Determinazione della resistenza all'urto

In molti aspetti la norma italiana UNI 9302:1988 [29], che specifica un metodo di prova per la determinazione della resistenza all'urto per i contenitori in vetro, riprende lo standard europeo BS EN 12980:2000 [28] illustrato nel sottoparagrafo precedente. Tuttavia, tra le due norme vi sono degli scostamenti che vale la pena esporre.

Una prima differenza riguarda il martello del pendolo. Infatti, se per la norma europea [28] il battente può assumere diverse forme, per la norma italiana esso deve necessariamente essere di forma sferica, seppur sia ammessa la possibilità di variarne la dimensione in base all'energia d'urto che si vuole ottenere. La norma UNI 9302:1988 [29] esclude, poi, la variabilità ammessa dallo standard europeo in relazione alla durezza dell'acciaio utilizzato per il battente: questa non potrà più variare da 55 a 65 HRC, ma sarà fissata a 55 HRC. Inoltre, si richiede l'acciaio per la realizzazione della colonna e del sistema d'appoggio su cui giace il contenitore durante la prova.

Per quanto riguarda il quadrante, la norma italiana [29] specifica che i valori dell'energia d'urto riportati sulla scala a corona circolare debbano essere compresi tra 0 e 2,5 Nm, con divisioni di 0,05 Nm fino a 0,5 e di 0,1 Nm fino a 2,5.

Ulteriori differenze significative si rilevano nella procedura da adottare per condurre il test. Infatti, la norma UNI [29] stabilisce che, una volta colpito, al contenitore debbano essere impressi altri tre colpi con lo stesso valore di energia d'urto, ruotandolo ogni volta attorno al proprio asse di 90°.

Infine, per quanto riguarda il resoconto di prova, per la norma UNI esso è così strutturato come riportato in Tabella 7.

Tabella 7: informazioni contenute nel test report; UNI 9302:1988 Contenitori in vetro — Determinazione della resistenza all'urto

<i>Test semplice</i>	<i>Test a rottura</i>
Il numero di contenitori di cui è composto il lotto da controllare	Il numero di contenitori di cui è composto il lotto da controllare
Il numero di contenitori costituenti il campione sottoposto a prova	Il numero di contenitori costituenti il campione sottoposto a prova
Il valore dell'energia d'urto in Newton per metro stabilito per la prova	Il valore dell'energia d'urto in Newton per metro stabilito per la prova
Il numero di contenitori che non hanno superato la prova	Il numero di contenitori che non hanno superato la prova
	Il valore limite di energia fissato per verificare la resistenza a rottura
	I valori di energia ai quali si sono verificate le rotture .

4.4.7 UNI EN 29885:1996 Contenitori di vetro a bocca larga — Scostamento della planarità della superficie di tenuta superiore — Metodi di prova

La norma italiana UNI EN 29885:1996 [12] specifica due metodi di prova per la determinazione dello scostamento dalla planarità della superficie di tenuta superiore dei contenitori di vetro a bocca larga.

In particolare, l'apparecchiatura per effettuare il test consiste in una piastra di supporto orizzontale piana e in calibri a spessore graduati con precisione di 0,05 mm (per esempio, 0,05 mm, 0,1 mm, ecc.). Tuttavia, esistono strumenti alternativi, ideali per il controllo rapido e soprattutto per il controllo automatico, in grado di misurare il vuoto che si produce quando il contenitore è posizionato capovolto su una base di gomma ed è aspirata l'aria [12].

A questo punto è possibile distinguere due procedure, a seconda se si voglia determinare lo stato di conformità della superficie di tenuta superiore rispetto ai requisiti predeterminati di planarità oppure lo scarto della planarità della superficie di tenuta superiore.

Nel primo caso il test avviene come di seguito [12]:

1. Posizionare il contenitore capovolto sulla piastra d'appoggio. Se il contenitore è instabile, farlo stabilizzare prima di continuare la prova;
2. Scegliere un calibro a spessore che corrisponda allo scostamento massimo di planarità ammesso;
3. Tentare di inserire il calibro nell'incavo, se presente, tra la piastra di appoggio e la superficie di tenuta superiore, lungo tutta la circonferenza della bocca. Durante questa operazione è necessario verificare che il calibro sia piatto sulla piastra di appoggio e che vi scorra liberamente. Il calibro a spessori si considera inserito quando la punta raggiunge il bordo interno della bocca, a condizione che il contenitore non oscilli né si muova durante il test;
4. Se il calibro non può essere inserito da nessun lato, il requisito di planarità del contenitore è considerato soddisfatto;
5. Se il calibro può essere inserito, ripetere il procedimento utilizzando il calibro di spessore immediatamente maggiore. Se questo secondo calibro non può essere inserito, il requisito di planarità del contenitore è considerato soddisfatto. Invece, se questo secondo calibro può essere inserito, il requisito di planarità del contenitore non è soddisfatto.

Per quanto riguarda la seconda prova, invece [12]:

1. Posizionare il contenitore capovolto sulla piastra d'appoggio. Se il contenitore è instabile, farlo stabilizzare prima di continuare la prova;
2. Scegliere un calibro a spessore che corrisponda allo scostamento massimo di planarità ammesso, oppure selezionare il calibro più piccolo o il calibro immediatamente successivo (cioè 0,1 mm);
3. Cercare di inserire il calibro a spessori scelto, utilizzando lo stesso procedimento descritto per l'altra prova. Continuare con calibri più piccoli o più grandi, a seconda delle necessità. La procedura è conclusa quando si identificano due calibri che differiscono per spessore di una sola graduazione (cioè 0,05 mm), di cui il più piccolo può essere inserito ed il più grande no.

Secondo la norma [12], se sono richiesti risultati per attributi si deve assumere come risultato il numero di contenitori che rispondono al requisito di planarità. Diversamente, per ogni contenitore sottoposto a prova, il risultato sarà lo spessore, in millimetri, del calibro più piccolo tra i due identificati.

All'interno del test report dovranno quindi essere riportate, per ciascun tipo di prova condotta, le informazioni riassunte in Tabella 8 [12].

Tabella 8: informazioni contenute nel test report; UNI EN 29885:1996 Contenitori di vetro a bocca larga — Scostamento della planarità della superficie di tenuta superiore — Metodi di prova

Riferimento alla norma UNI EN 29885:1996
Il riferimento al tipo di prova svolto
le dimensioni del campione ed il tipo di contenitore sottoposto a prova
Particolari relativi alla fabbricazione dei contenitori
Il tipo di apparecchiatura utilizzata
I risultati ottenuti
Data della prova
Firma del responsabile

4.4.8 UNI EN 29009:1996 Contenitori di vetro — Altezza e non parallelismo della bocca con riferimento alla base del contenitore — Metodi di prova

La norma italiana UNI EN 29009:1996 [10] specifica dei metodi di prova per i contenitori in vetro relativi a due caratteristiche tecniche di qualità, ovvero altezza e non parallelismo della bocca con riferimento alla base del contenitore.

Per quanto riguarda la verifica dell'altezza del contenitore, l'apparecchiatura da utilizzare consiste principalmente in [10]:

- Calibro per altezza: costituito, per esempio, da una piastra di appoggio con una o due colonne verticali e:
 - a) Una traversa orizzontale fissa: in questo caso, la distanza tra la piastra di appoggio e la traversa corrisponde alla dimensione da misurare;
 - b) Una traversa orizzontale fissa con gradino: in questo caso, le distanze tra la piastra di appoggio e le due porzioni della traversa rappresentano rispettivamente le altezze massima e minima da misurare;
 - c) Una traversa orizzontale regolabile: può essere fissata ad una distanza dalla piastra di appoggio equivalente alla distanza da misurare.

- Calibro a finestra: combina un diametro minimo del corpo con un'altezza massima.

Pertanto, il test relativo alla verifica dell'altezza del contenitore si svolge come segue [10]:

1. Posizionare il contenitore sulla piastra di appoggio in metallo;
2. Regolare il calibro per altezze in modo che le altezze minima e massima corrispondano ai requisiti di tolleranza di altezza, con un'accuratezza di 0,1 mm (Figura 17);
3. Individuare i contenitori che possono scorrere sotto la parte più alta del calibro e quelli che non scorrono sotto la parte più bassa.

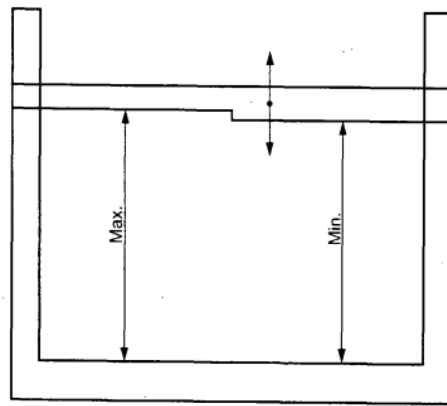


Figura 17: esempio di calibro per altezze; UNI EN 29009:1996 Contenitori di vetro — Altezza e non parallelismo della bocca con riferimento alla base del contenitore — Metodi di prova [10]

In questo caso, quindi, se sono richiesti risultati per attributi è necessario assumere come risultato il numero di contenitori che rispondono ai requisiti di tolleranza di altezza [10].

Per la determinazione dell'altezza (massima) esistono, invece, calibri di diverso tipo, quali un calibro a nonio per altezze o un micrometro per altezze. Tali apparecchi devono avere un'accuratezza di misura di almeno 0,1 mm. Si assume, pertanto, come risultato della prova l'altezza misurata in mm [10].

Infine, per la determinazione del non parallelismo, gli apparecchi possono essere calibri per altezze con traversa orizzontale regolabile, calibri a spessori graduati a 0,1 mm o gli apparecchi descritti per la determinazione dell'altezza. Per eventuali determinazioni qualitative veloci, può essere utilizzata una livella a bolla d'aria. In questo caso la procedura della prova è la seguente [10]:

1. Posizionare il contenitore sulla piastra di appoggio metallica;

2. Mediante un calibro a nonio per altezze, o un altro apparecchio idoneo, misurare con un'accuratezza di 0,1 mm il punto più basso della bocca (cioè l'altezza minima) e, se non già determinato, anche il punto più alto (cioè l'altezza massima) (Figura 18).

In questo caso si assume, dunque, come risultato della prova la differenza tra le altezze massima e minima, determinate in millimetri [10]

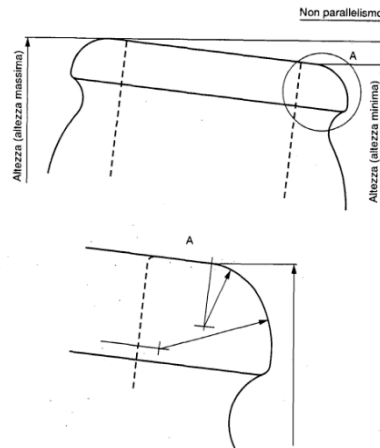


Figura 18: non parallelismo; UNI EN 29009:1996 Contenitori di vetro — Altezza e non parallelismo della bocca con riferimento alla base del contenitore — Metodi di prova [10]

All'interno del test report dovranno quindi essere riportate, per ciascun tipo di prova condotta, le informazioni riassunte in Tabella 9 [10].

Tabella 9: informazioni contenute nel test report; UNI EN 29009:1996 Contenitori di vetro — Altezza e non parallelismo della bocca con riferimento alla base del contenitore — Metodi di prova

Riferimento alla norma UNI EN 29009:1996
Il riferimento al tipo di prova svolto
le dimensioni del campione ed il tipo di contenitore sottoposto a prova
Particolari relativi alla fabbricazione dei contenitori
Il tipo di apparecchiatura utilizzata
I risultati ottenuti
Data della prova
Firma del responsabile

4.4.9 UNI EN 29008:1996 Bottiglie di vetro — Verticalità — Metodo di prova

La norma italiana UNI EN 29008:1996 [11] specifica un metodo di prova per la determinazione della verticalità delle bottiglie di vetro. In particolare, il presente metodo non

solo determina lo scostamento dell'intero corpo dalla verticale, ma valuta anche l'effetto combinato di altre deformazioni, come, per esempio, lo scostamento del collo dalla verticale, la bocca fuori asse e l'ovalizzazione della bocca.

Per quanto riguarda l'apparecchiatura coinvolta nella prova, questa deve essere in grado di mantenere la base della bottiglia in posizione orizzontale e di misurare lo scostamento della bocca dalla verticale con un'accuratezza di 0,1 mm. Gli strumenti utilizzabili sono di varia natura e consentono di ricavare la misura [11]:

- Per confronto con una scala orizzontale;
- Mediante un comparatore a quadrante;
- Proiettando un'ombra ingrandita su una scala.

In tutti i casi, le misurazioni sono eseguite sull'esterno della bocca. Per le bottiglie rotonde la soluzione più semplice consiste in un calibro per verticalità che prevede una piastra di appoggio munita di un blocco a V, o una piastra rotante con mandrino autocentrante a tre o quattro ganasce, e una colonna verticale sui cui è montato un tracciante orizzontale o un comparatore a quadrante regolabile in altezza e in lunghezza. In alternativa, si può utilizzare un apparecchio a scansione luminosa senza contatto. Invece, per le bottiglie non rotonde dovrebbe essere utilizzato un dispositivo in grado di tenere la bottiglia al centro di una piastra rotante. In ogni caso, può essere utilizzata un'apparecchiatura diversa da quella specificata, a condizione che si ottenga lo stesso grado di accuratezza nelle rilevazioni [11].

A questo punto, lo Standard prevede due procedure, a seconda che si tratti di bottiglie rotonde o non rotonde. Per le bottiglie rotonde è sufficiente posizionare il campione sulla piastra di appoggio orizzontale e spingerlo contro il blocco a V con una forza inclinata di 45° rispetto all'orizzontale, oppure collocarlo su una piastra rotante orizzontale in un mandrino autocentrante a tre o quattro ganasce. Per le bottiglie non rotonde, è necessario inserirle nel dispositivo apposito per la misurazione. A seconda del caso, potrebbe essere necessario ruotare la bottiglia o la piastra di 360° e registrare, con un'accuratezza di 0,1 mm, la distanza minima e massima dell'esterno della bocca da un punto fisso sullo stesso piano orizzontale. In generale, lo scostamento verticale sarà pari alla metà della differenza tra le distanze massima e minima misurate [11].

All'interno del test report dovranno quindi essere riportate le informazioni riassunte in Tabella 10 [11].

Tabella 10: informazioni contenute nel test report; UNI EN 29008:1996 Bottiglie di vetro — Verticalità — Metodo di prova

Riferimento alla norma UNI EN 29008:1996
Il riferimento al tipo di prova svolto
le dimensioni del campione ed il tipo di contenitore sottoposto a prova
Particolari relativi alla fabbricazione dei contenitori
Il tipo di apparecchiatura utilizzata
I risultati ottenuti
Data della prova
Firma del responsabile

4.4.10 ASTM C149 – 14 Standard Test Method for Thermal Shock Resistance of Glass Containers

Lo standard ASTM C149 – 14 [30] consente di determinare la resistenza dei contenitori di vetro commerciali (bottiglie e vasi) allo shock termico ed è destinato ad essere applicato a tutti i tipi di contenitori di vetro che devono resistere a improvvisi cambiamenti di temperatura durante l'uso, come nei processi di lavaggio, pastorizzazione o confezionamento a caldo, o nel trasferimento da un mezzo caldo a uno più freddo o viceversa.

Per quanto riguarda l'apparecchiatura, questa consiste in [30]:

- Un cestello per mantenere i contenitori di vetro in posizione verticale, due serbatoi (uno per l'acqua calda e uno per l'acqua fredda) e un sistema automatizzato per immergere e trasferire il cestello dal bagno caldo a quello freddo;
- Un dispositivo per garantire che la temperatura dell'acqua nei serbatoi resti entro $\pm 1,1$ °C (2 °F) dalle temperature specificate. Si raccomanda l'utilizzo di regolatori per monitorare il riscaldamento dell'acqua calda e il raffreddamento dell'acqua fredda. In alternativa, è possibile utilizzare termometri a quadrante e controllare manualmente la temperatura;
- Serbatoi con capacità minima di 3,8 litri per ogni 0,45 kg di vetro da testare.

Nella Figura 19 è illustrato un esempio di apparecchiatura (macchina automatica per prova di shock termico).

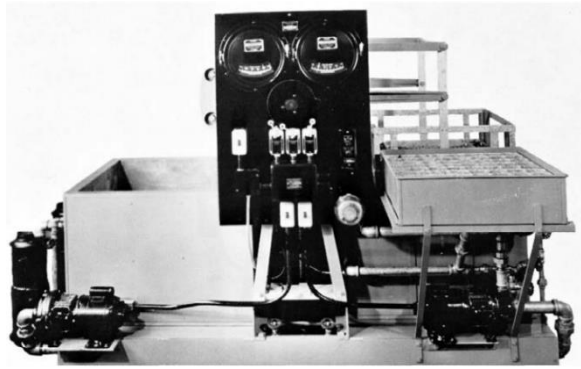


Figura 19: macchina automatica per lo shock termico. Fonte: C149 – 14 Standard Test Method for Thermal Shock Resistance of Glass Containers [30]

Per quanto riguarda la procedura, questa è così articolata [30]:

1. Impostare la temperatura del bagno freddo a 21 °C e quella del bagno caldo a una temperatura superiore di un differenziale specificato, preferibilmente 42 °C. Di conseguenza, la temperatura iniziale di immersione dovrà essere di 63 °C. Se si utilizza una temperatura diversa del bagno freddo, il differenziale specificato può essere regolato di 0,5 °C per ogni aumento (o diminuzione) di 5,6 °C al di sopra (o al di sotto) della temperatura del bagno freddo consigliata;
2. Riempire parzialmente o completamente il cestello con i contenitori vuoti. Quando le temperature dei bagni sono entro $\pm 1,1$ °C da quelle specificate, immergere il cestello nel bagno caldo in modo tale che i contenitori si riempiano completamente di acqua calda. A questo punto, lasciare i contenitori in ammollo per 5 minuti prima di trasferirli nel bagno freddo, dove dovranno rimanere per 30 secondi prima di essere estratti. Il tempo di trasferimento dal bagno caldo a quello freddo deve essere di 15 ± 1 s.

In base alla natura della prova che si vuole eseguire, può essere svolto uno dei seguenti test [30]:

1. *Test di superamento*: applicare il test utilizzando un differenziale di temperatura predeterminato. Questo test è adeguato per il controllo di routine di campioni provenienti dalla produzione continua in uno stabilimento del produttore;
2. *Prova progressiva ad una percentuale specificata di rotture*: quando è opportuno, la prova descritta può essere ripetuta aumentando gradualmente la differenza di

temperatura con incrementi uniformi (solitamente 2,8 o 5,6 °C per ogni fase), aumentando la temperatura del bagno di acqua calda, fino a raggiungere la rottura della percentuale predeterminata di contenitori;

3. *Prova progressiva totale*: in alternativa, la prova progressiva può essere prolungata fino al fallimento di tutti i contenitori testati;
4. *Test di alto livello*: può essere effettuato un singolo test con un differenziale di temperatura predeterminato sufficientemente alto da provocare la rottura di una parte del campione.

Le informazioni da riportare nel test report sono elencate in Tabella 11.

Tabella 11: informazioni contenute nel report; ; ASTM C149 – 14 Standard Test Method for Thermal Shock Resistance of Glass Containers

<i>Test di superamento</i>	<i>Prova progressiva ad una percentuale specificata di rotture</i>	<i>Prova progressiva totale</i>	<i>Test di alto livello</i>
Riferimento alla norma ASTM C 149 - 14	Riferimento alla norma ASTM C 149 - 14	Riferimento alla norma ASTM C 149 - 14	Riferimento alla norma ASTM C 149 - 14
Numero dei contenitori che formano il campione testato; descrizione del metodo di campionamento utilizzato	Numero dei contenitori che formano il campione testato; descrizione del metodo di campionamento utilizzato	Numero dei contenitori che formano il campione testato; descrizione del metodo di campionamento utilizzato	Numero dei contenitori che formano il campione testato; descrizione del metodo di campionamento utilizzato
Tempo di trasferimento utilizzato	Temperatura del bagno freddo	Temperatura del bagno freddo	Temperatura del bagno freddo
Differenza di temperatura; numero di contenitori che non hanno superato il test;	Differenza di temperatura alla quale si è verificato il primo fallimento; numero di contenitori che si sono guastati	Differenze di temperatura utilizzate nel test; numero di contenitori che si sono guastati a ogni differenza di temperatura; differenza di temperatura media alla quale si verifica il guasto (corretta per la dimensione dell'incremento o dello step di temperatura utilizzato sottraendo la metà dell'incremento)	Differenza di temperatura utilizzata nel test; numero di contenitori che hanno ceduto a quella differenza di temperatura

4.4.11 ASTM C224 – 78 Standard Practice for Sampling Glass Containers

Lo standard ASTM C224 – 78 [31] riguarda il campionamento di contenitori in vetro (ad esempio, bottiglie, vasi, ecc.) per eseguire test di resistenza allo shock termico, di verifica delle dimensioni e di altre caratteristiche misurabili, oltre che per l'esame visivo. In generale, la norma stabilisce che il campione per effettuare le verifiche di ricottura, di pressione interna, di resistenza allo shock termico, delle caratteristiche visibili e dimensionali dei contenitori in vetro debba essere dimensionato seguendo le indicazioni della norma *MIL-STD-105E* [34].

Particolarmente interessante è la Tabella 12, che stabilisce la dimensione minima del campione per le casistiche non specificate dalla *MIL-STD-105E* [34].

Tabella 12: minimo numero di unità del campione. Fonte: ASTM C224 – 78 Standard Practice for Sampling Glass Containers [31]

Classification (Test or Examination to be Made on Specimen)	Continuous Production (Lehr)		Lot, Minimum Number of Containers
	Minimum Number	Time Schedule	
Annealing	3 ^A	3 h or less	20
Internal Pressure	1 round ^B	3 h or less	50 ^C
Thermal Shock	1 round ^B	variable ^D	50 ^C
Visible Characteristics	not applicable ^E	not applicable ^E	F
Dimensional Characteristics	1 round	variable ^G	50 ^H

Per lo shock termico, le caratteristiche visibili dei contenitori e per le caratteristiche dimensionali le dimensioni minime del campione sono definite come segue [31]:

- Shock termico: nel caso di un controllo continuo (*Continuous Production*) è necessario testare almeno un campione per ciascuna cavità dello stampo della macchina di formatura. I test devono essere condotti esclusivamente su pezzi che hanno superato l'ispezione visiva. Inoltre, a causa della grande variabilità dei requisiti di shock termico nel commercio e della diversa suscettibilità agli shock termici di vari design, il programma temporale appropriato per ciascuna situazione deve essere stabilito individualmente.
- Caratteristiche visibili: in questo caso il controllo deve essere effettuato a campione, e non su tutta la produzione. Il campione è utilizzato con l'obiettivo di classificare i prodotti in accettabili e non accettabili, pertanto si consiglia di stabilire accordi di campionamento tra acquirente e produttore seguendo le linee guida della *MIL-STD-105E* [34]. Questo metodo raccomanda le dimensioni del campione in base alla dimensione del lotto e alla frequenza prevista di difetti inaccettabili.

- Caratteristiche dimensionali: nel caso di un controllo a tappeto, è necessario verificare almeno un campione per ogni ciclo di produzione (H). Se si opta per un controllo a campione, invece, nel caso di controllo per attributi dovrebbero essere esaminati almeno cinquanta contenitori come primo campione e cinquanta contenitori come secondo campione, seguendo il principio della *MIL-STD-105E* [34]. Diversamente, per il controllo basato su variabili è richiesto un campione minimo di una unità per ciascuna cavità dello stampo rappresentata nel lotto.

Le informazioni da riportare nel test report sono racchiuse in Tabella 13.

Tabella 13: informazioni contenute nel test report; ASTM C224 – 78 Standard Practice for Sampling Glass Containers

<i>Controllo a tappeto</i>	<i>Controllo a campione</i>
Riferimento alla norma C 224 - 78	Riferimento alla norma C 224 - 78
Stile, taglia, colore e manifattura del lotto valutato	Stile, taglia, colore e manifattura del lotto valutato
Luogo di produzione, il momento del campionamento, la designazione dello stampo individuale (se pertinente)	L'identificazione della spedizione o la posizione in magazzino (se pertinente)
Dimensione del campione e numero di casse campionate (se provenienti da lotti in casse)	Dimensione del campione e numero di casse campionate (se provenienti da lotti in casse)
Metodo di prelievo dei campioni	Metodo di prelievo dei campioni
Risultati della valutazione e la destinazione del lotto in base al campione prelevato	Risultati della valutazione e la destinazione del lotto in base al campione prelevato

5. Verifica dimensionale e geometrica dei vasi

Esistono diversi strumenti per la verifica dimensionale e geometrica dei vasi in vetro, ciascuno adatto a specifiche esigenze di controllo e precisione. Nel seguente capitolo, tali strumenti saranno descritti distinguendoli in due famiglie, i dispositivi utilizzabili direttamente sulla linea di produzione e i dispositivi destinati al controllo su campioni selezionati. Di questi, gli strumenti inline sono generalmente automatizzati e consentono un monitoraggio costante e rapido del prodotto, utile per individuare immediatamente eventuali difetti. Diversamente, gli strumenti per l'analisi su campione, spesso più precisi e sofisticati, sono utilizzati per verifiche approfondite su un numero limitato di prodotti, garantendo un più rigoroso rispetto degli standard di qualità.

5.1 Sistemi per la verifica in linea

Per monitorare i parametri geometrici e dimensionali dei vasi direttamente sulla linea di produzione, possono essere implementati diversi sistemi di verifica. In generale, però, questi consistono prevalentemente in sistemi di natura machine vision. Infatti, al giorno d'oggi i sistemi di visione artificiale sono sempre più utilizzati nei contesti industriali, tra cui quello alimentare, per via dell'accuratezza e dell'immediatezza con cui consentono di verificare che le caratteristiche di un oggetto rientrino nei valori di specifica, grazie all'utilizzo di telecamere ad alta risoluzione per la scansione degli oggetti e di software specializzati per l'elaborazione delle immagini [35]. Pertanto, basandosi sul processamento di immagini e sul riconoscimento statistico di modelli, è evidente come quello della visione artificiale sia un campo complesso che richiede necessariamente una conoscenza approfondita delle seguenti discipline [36]:

- Algoritmi ed euristiche per l'elaborazione delle immagini;
- Elementi di reti;
- Elettronica digitale;
- Ingegneria industriale;
- Ottica;
- Ingegneria meccanica;
- Controllo qualità;
- Ingegneria del software e dei sistemi;

- Sensoristica;
- Gestione dell'interfaccia con l'utente.

Tuttavia, l'accuratezza e l'immediatezza delle misurazioni non sono gli unici vantaggi a rendere i sistemi machine vision uno strumento di controllo qualità così valido [36]. Questi, infatti, sono anche degli strumenti altamente automatizzati che consentono di effettuare le verifiche senza l'intervento umano, veloci, di precisione e in grado di fornire dei risultati altamente ripetibili, dal momento che le misurazioni non sono affette dal fattore umano [37]. Ancora, i sistemi machine vision offrono la possibilità di tracciare e documentare le informazioni scansionate, così da semplificare le ricerche delle cause di eventuali difettosità o non conformità di prodotto, nonché di ridurre i costi del controllo qualità sul lungo periodo, a fronte di un elevato investimento iniziale, e, infine, di verificare diverse caratteristiche-prodotto contemporaneamente [37].

Nel caso specifico dei vasi in vetro per il confezionamento alimentare, i sistemi di visione artificiale consentono di verificare le dimensioni e la geometria dei contenitori [36], soprattutto in termini di forma, evidenziandone eventuali difetti o deviazioni e parametri come, per esempio, l'altezza, il diametro dell'imboccatura (sia interno che esterno), la planarità e il parallelismo della bocca, lo spessore delle pareti e la capacità raso bocca [38].

Tuttavia, l'applicazione delle tecnologie di machine vision al vetro presenta delle difficoltà legate alla trasparenza e alla proprietà di rifrazione del materiale. Infatti, il vetro è sia in grado di farsi attraversare dalla luce senza diffonderla o assorbirla, sia caratterizzato da un indice di rifrazione relativamente alto (circa 1,5–1,7) [36]. Pertanto, al fine di poter ottenere dei risultati soddisfacenti, è necessario calibrare correttamente gli strumenti e schermare l'oggetto in vetro dalla luce naturale durante l'ispezione.

5.1.1 Le fotocamere a scansione lineare

Un sistema di machine vision particolarmente utilizzato nell'industria alimentare è quello delle fotocamere a scansione lineare, dal momento che queste sono particolarmente efficaci sia per ispezionare oggetti di dimensione medio-grande e con geometria cilindrica [36], sia per la misurazione di oggetti in continuo movimento, su rulli o nastri trasportatori, in spazi ristretti [39]. Nel dettaglio, questo sistema prevede l'utilizzo di una rete di fotocamere a

scansione che sfrutta il principio della retroilluminazione, in cui la fonte luminosa, il contenitore e la fotocamera sono in linea. La Figura 19 ne mostra un'implementazione [36].

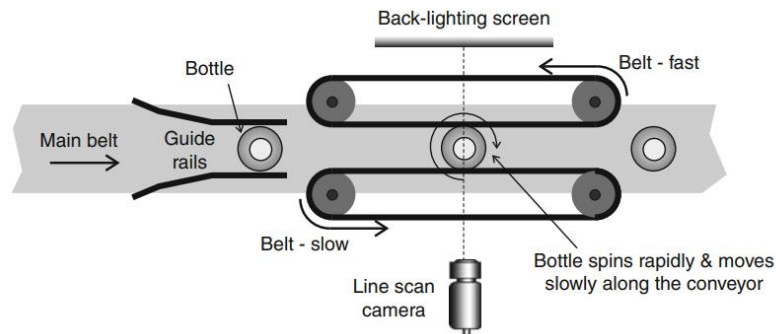


Figura 19: configurazione di un sistema di telecamere a scansione lineare. Fonte: Machine Vision Handbook [36]

Durante l'ispezione, il contenitore (bottiglia o vaso) avanza velocemente su un nastro trasportatore, ruotando lentamente su se stesso indirizzato dal movimento di due nastri controrotanti (Figura 19) [36]. Nello specifico, è proprio questo movimento che consente alla telecamera a scansione lineare di rilevare le caratteristiche locali del vaso o della bottiglia. Tuttavia, la sola acquisizione dell'immagine del contenitore non è sufficiente per poter effettuare le misurazioni: bisognerà dapprima produrne un'immagine binaria. Dunque, in Figura 20 è illustrato il processo che consente di ottenere questa particolare immagine [36].

Batchelor sostiene che una volta acquisita l'immagine originale (Figura 20a), il primo passaggio consista nel variare l'intensità dello sfondo. Pertanto, in Figura 20b è possibile vedere i valori di intensità della fotografia originale. Successivamente, riducendo il numero di livelli di colore e aumentandone il contrasto, si comprime l'immagine cercando di enfatizzare l'intensità variabile dello sfondo (Figura 20c), al fine di delineare il bordo del contenitore eliminando il rumore dell'acquisizione (Figura 20d e 20e). Completati questi passaggi, sono proiettate l'ombra destra e sinistra del contenitore (Figura 20f e 20g), successivamente unite per delineare la sagoma complessiva dell'oggetto (Figura 20h) [36].

Ultimata la tracciatura del bordo, si procede con la valutazione delle dimensioni e della geometria del contenitore, ovvero con la verifica dei profili verticali, del collo, della spalla e della simmetria [36]. In merito, il vantaggio di questa tecnologia è che consente di effettuare misurazioni di posizione assoluta nella direzione verticale, dal momento che sono

note le specifiche dei contenitori che si stanno misurando. Per esempio, per verificare se i profili di una bottiglia (o vaso) siano o meno dritti, *Batchelor* [36] sostiene di poter usare come riferimenti due linee di scansione orizzontali, una posizionata sotto la spalla, ad altezza Y_2 , e l'altra appena sopra la base, ad altezza Y_1 [36]. A partire da queste linee sarebbe, quindi, possibile determinare le corrispondenti coordinate in X, tracciare una linea tra i punti (X_1, Y_1) e (X_2, Y_2) e in ispessirla in base alle tolleranze specificate. A questo punto, il bordo della bottiglia dovrebbe trovarsi interamente all'interno di questa linea ispessita (Figura 21) [36].

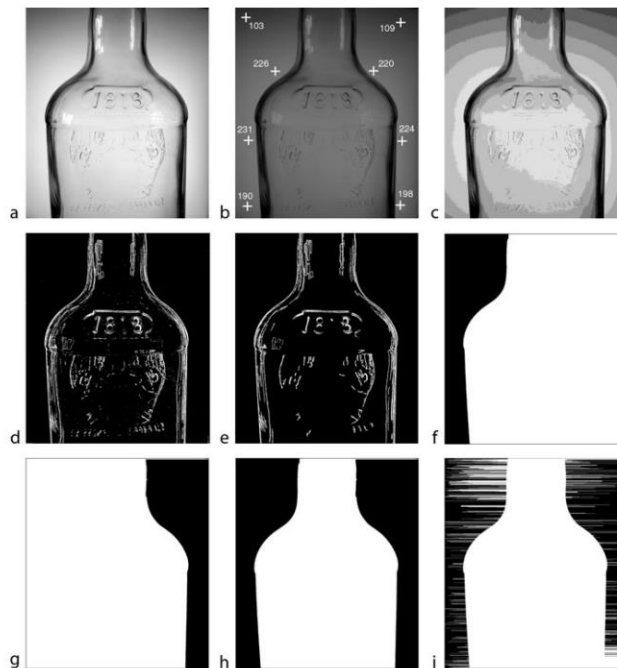


Figura 20: produzione dell'immagine binaria di un contenitore in vetro.
Fonte: *Machine Vision Handbook* [36]

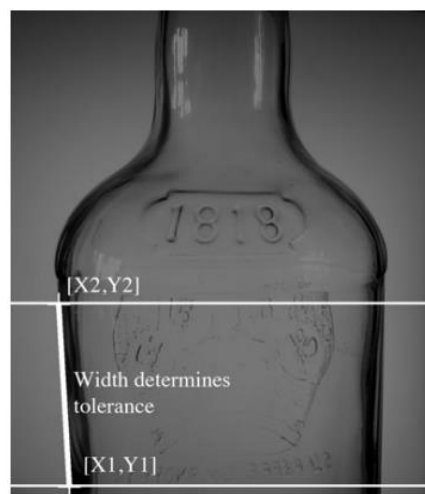


Figura 21: misurazione della pareti laterali di un contenitore. Fonte:
Machine Vision Handbook [36]

5.1.2 Gli scanner 3D

In alternativa alle fotocamere a scansione lineare, un altro sistema di controllo, ispezione e acquisizione dati basato su fotocamere e algoritmi per l'elaborazione delle immagini è quello degli scanner 3D. In particolare, *Chougule et al.* [40] descrivono gli scanner 3D come uno strumento in grado di creare un modello tridimensionale digitale di un oggetto, a partire da un set di punti che rappresenta le informazioni riguardanti la geometria (la forma), il colore e il pattern dell'oggetto stesso. Il processo di elaborazione della nuvola, noto come ricostruzione, è, quindi, essenziale per generare il file STL (Stereo Lithography) in grado di replicare tridimensionalmente l'oggetto originale [40].

Ciò rende la scansione tridimensionale digitale (3D) una tecnica metrologica altamente efficace. Tuttavia, come già discusso introducendo le tecniche di machine vision, l'utilizzo degli scanner 3D diventa complesso quando ad essere sottoposti a verifica sono oggetti trasparenti, quindi con caratteristiche di riflessione e rifrazione tali da interferire con i dati acquisiti, creando errori di misurazione e immagini distorte [36]. *Karami et al.* [41] evidenziano che l'efficacia di questi metodi dipende dalla capacità della superficie dell'oggetto di riflettere diffusamente la luce in entrata, motivo per cui è sovente l'utilizzo di trattamenti di verniciatura (o polverizzazione) delle superfici in vetro per rendere gli oggetti opachi e riflettenti diffusamente. Tuttavia, l'implementazione di questa soluzione potrebbe influire negativamente sulla precisione della rilevazione, dal momento che lo spessore della polvere potrebbe modificare alcune caratteristiche dell'oggetto, tra cui il volume [41]. Per questo motivo, nel corso del tempo sono state sviluppate anche altre tecniche per poter utilizzare i sistemi di scansione tridimensionale con gli oggetti in vetro. Tra queste, alcune tecnologie individuate da *Miyazaki et al.* consentono di determinare le orientazioni superficiali degli oggetti trasparenti mediante i gradi di polarizzazione nelle lunghezze d'onda visibili e infrarosse [65,66] oppure l'implementazione di scanner ibridi in grado di sfruttare la fotogrammetria [42].

In particolare, in base alla tecnologia implementata, è possibile classificare gli scanner 3D attualmente più diffusi nei contesti industriali in scanner a luce strutturata, scanner fotogrammetrici e laser scanner. Ciononostante, di seguito saranno approfondite solo le prime due tecniche di misura, dal momento che l'applicazione degli scanner laser alle superfici in vetro è estremamente rara e di difficile implementazione.

Per quanto riguarda gli scanner 3D a luce strutturata, questi sono ampiamente utilizzati per la misurazione tridimensionale di oggetti di medie dimensioni, come possono esserlo i vasi in vetro destinati al packaging alimentare, al fine di studiarne la superficie e individuare eventuali difetti, soprattutto di forma. *Ojal et al.* [43] definiscono gli scanner 3D a luce strutturata come dei dispositivi di scansione senza contatto in grado di ricostruire digitalmente gli oggetti, attraverso la proiezione di un pattern noto sulla loro superficie e un sistema di telecamere capaci di captare le deformazioni del pattern stesso. Questi, nel descrivere il funzionamento dello strumento, illustrano due diversi approcci per ottenere la posizione dei punti sulla superficie, ovvero la triangolazione laser e la visione stereo, in base alla posizione dell'oggetto rispetto al campo visivo delle telecamere e del proiettore del pattern. In Figura 22c i segmenti “ab/bd” e “bc” individuano, rispettivamente, le aree soggette a triangolazione laser e quella analizzabile in visione stereo [43].

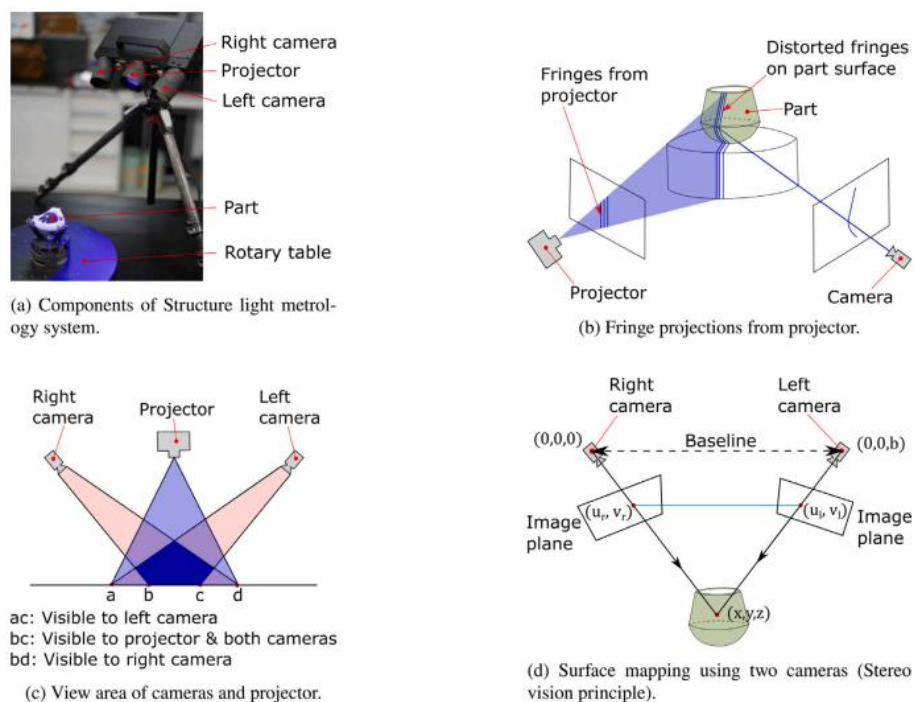


Figura 22: funzionamento di uno scanner 3D a luce strutturata. Fonte: *Optimizing exposure times of structured light metrology systems using a digital twin* [43]

Il processo di costruzione del modello tridimensionale dell'oggetto è, dunque, strutturato nelle seguenti fasi [43]:

1. Configurazione del sistema: consiste nel setup delle telecamere e del proiettore di luce strutturata;

2. Proiezione del pattern di luce sulla superficie dell'oggetto: questo può essere generato con varie configurazioni, tuttavia, quella più comune prevede la proiezione simultanea di fasci di luce orizzontali e verticali sull'oggetto. Particolarmente importante è la definizione e la larghezza del fascio luminoso, dato che le sue caratteristiche influiscono significativamente sulla precisione della scansione;
3. Acquisizione delle immagini deformate del pattern di luce: dal momento che nella maggior parte dei casi non è sufficiente l'acquisizione di una singola immagine per captare tutte le caratteristiche della superficie, spesso l'oggetto è posizionato su un dispositivo rotante in modo tale da poterne acquisire più viste.
4. Analisi del pattern distorto mediante software;
5. Ricostruzione 3D dell'oggetto con le relative rilevazioni geometrico-dimensionali;
6. Verifica e calibrazione dei risultati: a tal fine è necessario fare una valutazione accurata dei parametri impattanti sulla qualità dei dati misurati, cioè la configurazione dello scanner, le proprietà dell'oggetto analizzato, le modalità di acquisizione dei dati e delle condizioni ambientali (luce e temperatura) in cui hanno avuto luogo le rilevazioni.

Invece, per quanto riguarda gli scanner 3D basati sulla fotogrammetria, *Chougule et al.* [40] descrivono questo dispositivo come uno strumento in grado di rilevare le proprietà geometriche di un oggetto a partire dalla ricostruzione in tre dimensioni di sue viste multiple, acquisite mediante un sistema di fotocamere e rielaborate mediante un opportuno software di fotogrammetria. In particolare, affinché si possa perseguire una rilevazione delle informazioni di qualità è necessario che l'oggetto da scansionare sia posizionato in un ambiente chiaro, luminoso e ben illuminato [40] e che sia rivestito con polveri o spray opacizzanti se trasparente [67]. La lucentezza e le ombre presenti sull'oggetto possono rendere più complessa la ricostruzione 3D: le zone in ombra tenderanno a essere modellate come superfici curve e le aree lucide risulteranno ondulate. Tuttavia, queste criticità possono essere superate scattando diverse foto da molteplici angolazioni verticali [67].

Pertanto, gli scanner 3D fotogrammetrici sembrerebbero riprendere in modo sostanziale il funzionamento delle fotocamere a scansione lineare. Tuttavia, quest'ultime utilizzano una tecnologia che consente di scansionare l'oggetto in modo continuo, mentre gli scanner 3D fotogrammetrici utilizzano fotografie scattate da diverse angolazioni per ricostruire il modello 3D dell'oggetto testato. Quindi, la fotografia, che è il passo più critico nel metodo

della fotogrammetria 3D dato che include parametri come l'angolo di scatto, la distanza e le condizioni ambientali, influenza direttamente la produzione dei modelli 3D. Inoltre, gli scanner fotogrammetrici offrono risultati meno precisi sia rispetto agli scanner 3D a luce strutturata sia rispetto alle fotocamere a scansione lineare, dal momento che la precisione della rilevazione è fortemente impattata dalla qualità e dalla quantità di immagini acquisite, nonché dalle caratteristiche geometriche e superficiali del prodotto oggetto d'analisi [67].

In Figura 23 sono riportati gli elementi costituenti uno scanner 3D fotogrammetrico.

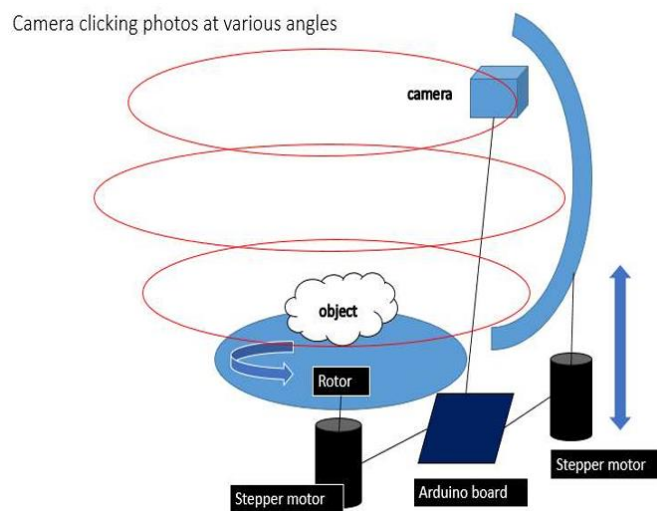


Figura 23: elementi di uno scanner 3D fotogrammetrico. Fonte: Review of Different 3D Scanners and Scanning Techniques [40]

Tra questi, ad oggi, le fotocamere a scansione lineare sono gli strumenti più utilizzati per la verifica inline delle specifiche dei vasi in vetro.

5.2 Strumenti e tecniche di laboratorio

Gli strumenti di misura utilizzati per campioni selezionati di prodotto permettono di rilevare eventuali difetti e variazioni nei materiali, nelle dimensioni e nelle geometrie dell'oggetto testato, offrendo dati essenziali per ottimizzare i processi produttivi e migliorare la qualità del prodotto finale. Questi possono variare ampiamente in termini di tecnologia e applicazione, spaziando da dispositivi manuali, come calibri e micrometri, a sistemi avanzati di scansione, come gli scanner 3D (implementabili anche sulla linea di produzione), le macchine di misura a coordinate (CMM), i tomografi e i microscopi a forza atomica (AFM).

5.2.1 Le macchine di misura a coordinate

Le macchine di misura a coordinate sono dispositivi che consentono di determinare le caratteristiche geometriche e dimensionali di un oggetto, mediante l'utilizzo di particolari sonde in grado di rilevare punti discreti sulla sua superficie. Pertanto, gli elementi costituenti le CMM sono il corpo, il registro e i cursori, le righe ottiche, il sistema di tastatura, l'unità di controllo, il software e l'hardware del computer [44]. Nello specifico, le sonde possono sfruttare molteplici tecnologie di rilevamento; tra queste i sensori ottici e a luce bianca sono meno diffuse rispetto alle sonde meccaniche o laser. A seconda della configurazione della macchina di misura, la gestione della sonda può avvenire manualmente tramite l'intervento di un operatore o automaticamente mediante un Direct Computer Control (*DCC*) [45]. Infine, come riportato da *Nikam*, sebbene nella maggior parte delle apparecchiature il movimento della sonda sia specificato unicamente lungo gli assi *XYZ*, ortogonali tra loro in un sistema di coordinate cartesiane tridimensionale, in alcune macchine di misura a coordinate è frequente trovare sistemi in grado di controllare anche l'angolo della sonda, affinché questa possa misurare punti della superficie altrimenti irraggiungibili [45].

In generale, la scelta del tipo di CMM da utilizzare dipende dalle caratteristiche dell'oggetto che si vuole analizzare e dal livello di precisione con cui si vogliono condurre le misurazioni. Per esempio, per i vasi in vetro per l'uso alimentare potrebbero risultare particolarmente efficaci le CMM a ponte, le CMM a colonna e le CMM a braccio articolato, viste le ridotte dimensioni del vaso e il buon compromesso che questi dispositivi offrono tra accuratezza e precisione della rilevazione, accessibilità e rapidità nell'elaborazioni dei risultati.

La CMM a ponte, che deve il suo nome alla struttura che sostiene la penna (asse *Z*) lungo l'asse *X* (Figura 24), è la variante più diffusa di macchina di misura a coordinate. In particolare, ogni asse è dotato di un sensore che monitora la posizione della sonda nella rispettiva direzione, tipicamente con precisione micrometrica. Nei sistemi in cui il rilevamento prevede il contatto, quando la sonda tocca un punto specifico sull'oggetto la macchina registra le coordinate misurando, così, le posizioni su ciascun asse, attraverso i tre sensori, del punto sulla superficie dell'oggetto [45]. Questo processo è, quindi, ripetuto diverse volte, spostando ogni volta la sonda in punti diversi sull'oggetto, fino ad acquisire una nuvola di punti in grado di descrivere la superficie di interesse, successivamente utilizzata per ricostruire le caratteristiche dell'oggetto tramite specifici algoritmi di regressione [45].

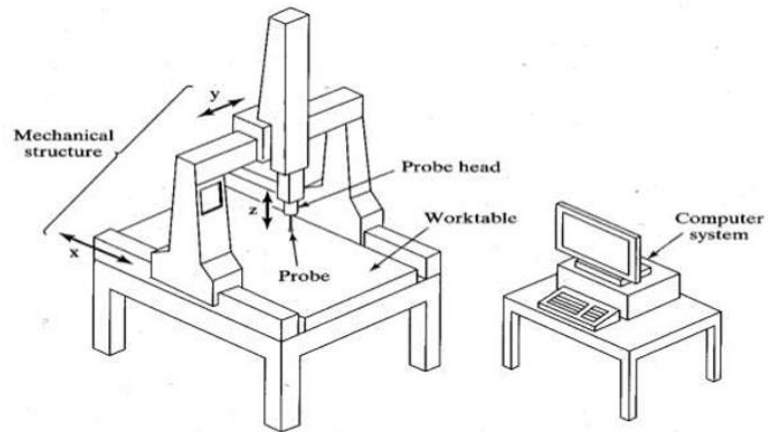


Figura 24: CMM a ponte. Fonte: Coordinate Measuring Machine (CMM) [45]

Diversamente, le CMM a colonna sono caratterizzate da una colonna verticale su cui è montata la sonda, che si muove sull'asse Z, e da un tavolo di misura su cui è posizionato l'oggetto da misurare, che consente il movimento lungo gli assi X e Y (Figura 25). In generale, questo strumento è da preferirsi per rilevazioni su elementi di piccole dimensioni, dal momento che la struttura rigida e compatta consente di eseguire misurazioni più precise. Anche in questo caso la sonda può essere o meno a contatto [45].

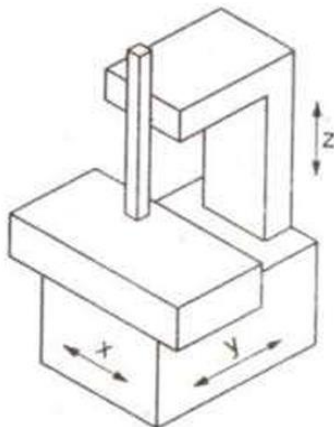


Figura 25: CMM a colonna. Fonte: Coordinate Measuring Machine (CMM) [45]

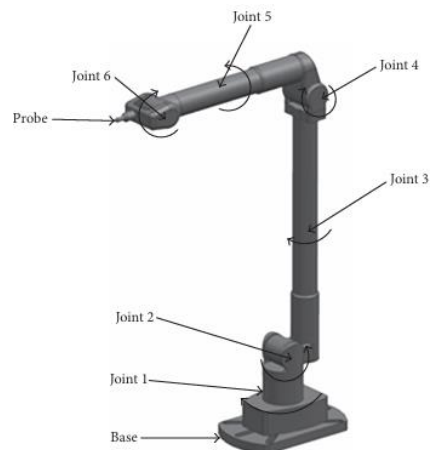


Figura 26: CMM a braccio articolato. Fonte: Structural Parameter Identification of Articulated Arm Coordinate Measuring Machines [45]

Infine, di particolare interesse sono anche le CMM a Braccio Articolato (Articulated Arm CMM). Nel funzionamento, queste possono essere assimilate a un robot con molteplici gradi di libertà (DOF), dal momento che, generalmente, consistono in un braccio snodato costituito

da tre tubi in leghe di alluminio o fibre di carbonio che può essere posizionato in molte configurazioni diverse (Figura 26). Pertanto, le caratteristiche che lo rendono particolarmente vantaggioso nei contesti aziendali sono la semplicità della struttura meccanica, le dimensioni ridotte, il peso contenuto e la capacità di poter testare anche geometrie complesse, dal momento che sono flessibili come un braccio umano. Tuttavia, la precisione di misurazione dell'AACMM è inferiore rispetto a quella della CMM ortogonali [46, 68].

In conclusione, le CMM possono essere utilizzate sia per misurazioni più semplici, come quelle di lunghezze e diametri, sia per rilevazioni complesse come le misurazioni di parti a forma libera.

5.2.2 La tomografia computerizzata a raggi X

La tomografia computerizzata a raggi X-CT è ampiamente implementata per la verifica dimensionale e geometrica degli oggetti, sia macroscopica sia microscopica, e, in particolare, per il controllo di spessori, volumi, delle caratteristiche superficiali, nonché per la definizione della forma degli oggetti mediante una loro ricostruzione tridimensionale. In particolare, i raggi X sono un insieme di fotoni con lunghezza d'onda compresa tra 10^{-8} e 10^{-11} m in grado di penetrare a fondo la materia. Le deformazioni che essi subiscono quando attraversano gli elementi permettono di generare dei segnali su cui è possibile elaborare le immagini dell'oggetto analizzato [47].

Come riportato da *Gao* in *Metrology*, l'applicazione della X-CT per le misure dimensionali si articola in tre fasi: (i) l'acquisizione delle proiezioni dei raggi X sull'oggetto, (ii) la ricostruzione di un modello tridimensionale del prodotto, e (iii) l'elaborazione dei dati (Figura 27) [48].

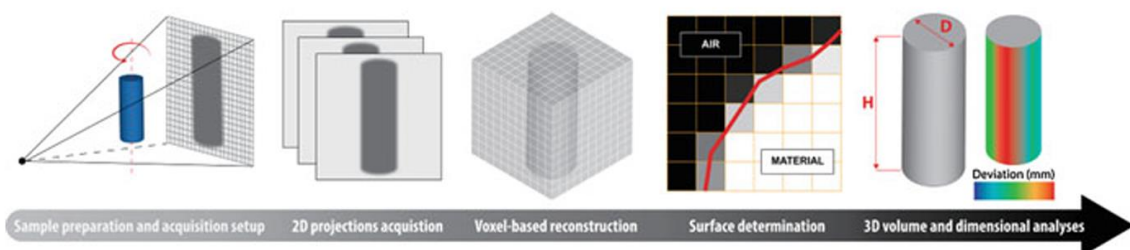


Figura 27: fasi della TC per le applicazioni industriali. Fonte: *Metrology* [49]

L'accuratezza delle ricostruzioni dipende, tuttavia, dal numero di proiezioni di raggi X captate nelle diverse posizioni angolari del prodotto durante la sua rotazione, elemento che impatta significativamente sulla velocità di produzione e processamento delle informazioni. Definito il modello tridimensionale, la procedura di elaborazione dei dati si articola in: (i) preelaborazione e miglioramento dei dati (tipicamente mediante l'utilizzo di filtri), (ii) segmentazione (ovvero, partizionamento del volume in due o più regioni) ed (iii) estrazione delle caratteristiche [48].

Un tipico sistema di tomografia computerizzata X-CT industriale è, quindi, costituito da tre componenti principali, ovvero una sorgente di raggi X, un sistema di posizionamento e un rivelatore, a cui si aggiunge un software di elaborazioni delle immagini necessario per l'elaborazione e l'analisi dei dati [49,50] (Figura 28).



Figura 28: tomografo per metrologia industriale: Fonte: Xrayconsult [71]

Le prestazioni di ciascuno di questi componenti possono influenzare profondamente le ricostruzioni 3D dell'oggetto, nonché le elaborazioni delle informazioni acquisite. Tuttavia, anche altri fattori risultano determinati per la corretta riuscita della procedura, come i fattori ambientali, la competenza dell'operatore nel settare e monitorare correttamente lo strumento di misura e le caratteristiche del prodotto (materiale, la texture superficiale, le dimensioni e la geometria dell'oggetto) [48].

In particolare, la texture superficiale del prodotto può causare deviazioni significative tra le misurazioni effettuate mediante X-CT e quelle ottenute attraverso misurazioni tattili. Pertanto, al fine di garantire la comparabilità dei risultati ottenute da e da sistemi di misurazione delle coordinate, le procedure per i test di accettazione e verifica dei sistemi X-

CT dovrebbero allinearsi ai principi guida delle CMM, ampiamente specificati dalla norma *UNI EN ISO 10360-2:2010* [48] [52].

In generale, quindi, la tomografia computerizzata a raggi X è ampiamente impiegata per il controllo qualità di prodotti che richiedono un controllo scrupoloso delle specifiche, come possono essere i vasi in vetro destinati al packaging alimentare, dal momento che permette di ispezionare contemporaneamente più caratteristiche dell'oggetto, interne ed esterne, di varia natura. Tuttavia, a fronte di un'alta qualità nelle misurazioni, la X-CT è sicuramente una tecnologia dall'implementazione costosa.

5.2.3 Il microscopio a forza atomica

Il microscopio a forza atomica, noto anche come microscopio a forza di scansione (SFM), permette di scansionare la superficie di un oggetto, al fine di produrne un'immagine topografica ad alta risoluzione, attraverso l'utilizzo di una sonda in grado di captare le forze repulsive e attrattive che insistono con la superficie del campione. Dal momento che la sonda si trova all'estremità di un braccio microcantilever flessibile, la sua interazione con la superficie comporta la deflessione del braccio, nel momento in cui si incontrano le caratteristiche topografiche. Pertanto, nella maggior parte dei casi, i cantilever hanno una caratteristica forma a V o rettangolare, sono realizzati in nitruro di silicio (Si_3N_4) o in silicio (Si), come le sonde, e sono rivestiti sulla superficie superiore da un sottile strato riflettente che può essere in oro (Au) o alluminio (Al) [53].

La presenza del materiale riflettente sul cantilever è essenziale affinché si possa elaborare l'immagine topografica a partire dalle rilevazioni sulla superficie del campione. Tale materiale, infatti, permette di riflettere il fascio laser, emesso da una sorgente posizionata di fronte al cantilever, verso il fotodetettore. Quindi, è la deflessione del cantilever a produrre una variazione nella posizione del punto laser sul fotorilevatore. La configurazione più comune per il fotodetettore è quella di un quadrante suddiviso in quattro parti con una linea di divisione orizzontale e una verticale. Come evidenziato da *Johnson* in *Basic Principles of Atomic Force Microscopy*, etichettando ciascuna area sul pannello da A a D come mostrato in Figura 29, il segnale di deflessione è calcolato dalla differenza nel segnale rilevato dai quadranti A + B rispetto ai quadranti C + D. Diversamente, il confronto della forza del segnale rilevato da A + C rispetto a B + D consente di rilevare la flessione laterale o la torsione della leva [53].

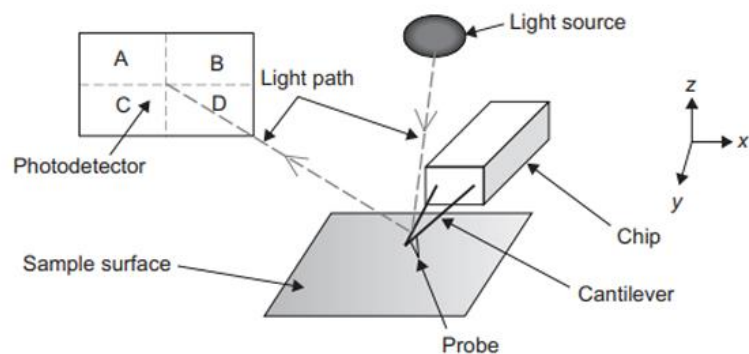


Figura 29: elementi di un AFM. Fonte: *Basic Principles of Atomic Force Microscopy* [53]

A seconda delle proprietà del campione e delle informazioni da elaborare, esistono varie metodologie con cui è possibile eseguire la scansione della superficie. Queste tecniche, in particolare, possono essere statiche o dinamiche, a seconda se la sonda rimanga in contatto costante con l'oggetto oppure che il cantilever oscilli, come avviene nella modalità intermittente e senza contatto. Per quanto riguarda la modalità in contatto, questa può essere eseguita in due varianti: applicazione di una forza costante oppure variabile. Nella modalità di forza costante è implementato un meccanismo di feedback per mantenere costante la deflessione del cantilever, diversamente, nella modalità a forza variabile i meccanismi di feedback sono disattivati, consentendo la monitorizzazione della deflessione al fine di generare l'immagine topografica. In questo secondo caso, quindi, possono essere analizzati solo campioni prevalentemente lisci o con caratteristiche superficiali minime [53].

Tuttavia, seppur la modalità di scansione in contatto sia la variante più semplice e più diffusa, essa presenta degli svantaggi principalmente legati al fatto che quando la sonda attraversa bordi ripidi sul campione, possono verificarsi delle forze laterali tali da comportare danni alla sonda o al campione, con conseguente diminuzione della risoluzione delle immagini. Pertanto, per superare tali difficoltà, spesso si ricorre alla modalità di misura intermittente, o di "tapping", ove il cantilever è autorizzato a oscillare a un valore vicino alla sua frequenza di risonanza. In questo modo quando le oscillazioni si avvicinano alla superficie del campione, la sonda si impegna e disimpegna ripetutamente rispetto alla superficie, limitando l'ampiezza dell'oscillazione [53].

Per quanto riguarda l'imaging in modalità di non contatto, invece, il cantilever oscilla come nella modalità di contatto intermittente, ma con un'ampiezza molto più piccola, consentendo, così, una maggiore risoluzione superficiale [53].

Infine, un altro elemento che deve essere considerato quando si eseguono misurazioni tramite AFM è la presenza di contaminanti sulla sonda, dal momento che questi potrebbero avere un effetto significativo sulla risoluzione dell'imaging, che dipende in larga misura dal raggio di curvatura della punta della sonda, il quale deve essere il più piccolo possibile [53].

6. Il caso Saclà

A partire dalle riflessioni e dagli approfondimenti emersi nella revisione della letteratura, il presente capitolo segna il passaggio dalla dimensione teorica a quella applicativa, attraverso lo studio di un caso concreto. L'analisi del caso proposto permette, infatti, di comprendere i risvolti pratici dei concetti teorici affrontati, evidenziando tanto le corrispondenze quanto le divergenze tra teoria e pratica.

6.1 Introduzione al caso studio

Saclà, fondata nel 1939 ad Asti, è una rinomata azienda nel settore delle conserve alimentari, specializzata sin dagli inizi nella lavorazione e conservazione di verdure fresche, realizzando prodotti come sottoli e sottaceti e, più recentemente, in seguito a una visione strategica improntata all'innovazione, sughi, pesti, e una vasta gamma di prodotti ispirati alla cucina mediterranea.

Uno dei tratti distintivi di *Saclà* è l'attenzione alla selezione degli ingredienti, spesso provenienti da fornitori locali, per garantire la tipicità e autenticità dei sapori, nonché la ricerca di un giusto equilibrio tra innovazione e rispetto delle radici culinarie italiane. Pertanto, l'azienda si impegna a distribuire un prodotto finale di qualità che, dal punto di vista di *Saclà*, rappresenta la conseguenza diretta di scelte rigorose, sia in termini di processi produttivi e gestionali, sia di prodotto, per quanto riguarda le caratteristiche degli alimenti selezionati e le specifiche del confezionamento.

Dunque, è proprio sotto l'aspetto del confezionamento primario che il caso *Saclà* si inserisce nella presente trattazione. Infatti, affinché i prodotti possano essere immessi con successo sul mercato, è essenziale che i vasi in vetro utilizzati per il confezionamento degli alimenti siano affidabili, ovvero che assolvano correttamente alla loro funzione di contenere, conservare e trasportare l'alimento.

A tal fine, attraverso lo studio del caso *Saclà* si vogliono analizzare le potenziali cause alla base della rottura dei vasi, soprattutto durante il trasporto, valutando in che misura tale criticità sia da attribuire a difetti intrinseci del prodotto, come fragilità del vetro o design inadatto, e/o a inefficienze nel sistema di controllo qualità.

Questo studio, dunque, si propone di fornire una panoramica delle problematiche che influiscono sull'integrità del prodotto e di suggerire, laddove possibile, dei miglioramenti, come l'implementazione di un sistema di controllo qualità più efficace, in base alle evidenze emerse dall'analisi della letteratura.

Nei prossimi paragrafi saranno, quindi, analizzate le caratteristiche dei vasi utilizzati da *Saclà* per il confezionamento degli alimenti, nonché il controllo qualità svolto in fase di accettazione dei vasi al fine di verificarne la conformità alle specifiche richieste.

6.2 I requisiti dei vasi

Per il confezionamento delle proprie conserve, attualmente, *Saclà* utilizza un assortimento di circa 21 tipi di vaso in vetro provenienti da 6 differenti fornitori: *Bormioli Rocco&Figlio S.p.A.*, *BSN glass pack*, *O-I*, *Saint-Gobain Vetri S.p.A.*, *Vead S.p.A.* e *Zignago Vetro S.p.A.*. Tuttavia, come sintetizzato in Tabella 14, la fornitura di una specifica tipologia di vaso, a cui è associata un codice-prodotto alfanumerico, non è necessariamente assegnata a un'unica azienda produttrice, ma è consuetudine di *Saclà* rifornirsi per il medesimo articolo da più fornitori.

Tabella 14: articoli e fornitori

Codice prodotto	Fornitore
D01T000	Bormioli, O-I, Saint Gobain, Zignago
D01C800	Bormioli, O-I
D01C900	Bormioli, O-I, Zignago
D01T200	Bormioli, O-I, Zignago, Saint-Gobain
D014702	Bormioli
D01T100	Bormioli, O-I, Zignago
D013701	O-I, Saint Gobain
D013801	O-I
D01G000	O-I
D0138DP	O-I, Saint Gobain
D014702	O-I, Saint Gobain
D014701	O-I, Saint Gobain
D015302	O-I
D015102	O-I, Zignago
D014001	Saint-Gobain
D011803	Saint-Gobain
D01DP00	Saint-Gobain
D014601	Saint-Gobain
D01T300	Saint-Gobain
D01D800	Saint-Gobain
D011801	Vead, Zignago

Per ciascun articolo, *Saclà* richiede ai propri fornitori la redazione di una *Scheda Tecnica* in cui specificare la composizione del vaso, le caratteristiche meccaniche e dimensionali, da evidenziare con disegno tecnico quotato, le caratteristiche chimiche, fisiche, le caratteristiche igienico-sanitarie e le caratteristiche logistiche.

In riferimento alle caratteristiche meccaniche e dimensionali, i parametri oggetto di interesse per *Saclà* sono: la forma, l'imboccatura, la capacità raso-bocca, la superficie interna totale (inclusa la bocca del vaso), il peso, la resistenza all'impatto, la resistenza al carico assiale, la resistenza allo shock termico, la verticalità, la planarità della bocca, il parallelismo bocca-fondo, l'ovalizzazione del corpo e il foro d'inizio. In particolare, *Saclà* specifica le *tolleranze ammesse* per il peso e la capacità raso bocca del vaso, nonché i *valori tipici* dell'imboccatura, della capacità raso bocca, del peso, della resistenza all'impatto, della resistenza al carico assiale e della resistenza allo shock termico.

Inoltre, per quanto riguarda i valori delle tolleranze relative alla capacità, verticalità e parallelismo bocca fondo dei *Vasi Standard*, questi sono determinati a partire dal documento *CE.T.I.E.DT6_rev3* [55]. Diversamente, per i *Vasi Personalizzati* i valori di riferimento per la capacità sono riportati in Tabella 15.

Tabella 15: tolleranze di capacità per i Vasi Personalizzati

Capacità nominale vaso [ml]	Tolleranza capacità [ml]
106	$\pm 2,5$
212	$\pm 3,0$
314	$\pm 4,0$
370	$\pm 5,0$
446	$\pm 5,0$
580	$\pm 5,0$
720	$\pm 10,0$

Tuttavia, dal momento che all'interno della documentazione fornita da *Saclà* [6] non è esplicitato il concetto di *valore tipico* di un parametro, al fine del presente studio si è assunto che esso sia il valore maggiormente osservato di una caratteristica, dato un codice prodotto proveniente da uno specifico fornitore. Pertanto, si è escluso che il *valore tipico* possa essere il *valore target* richiesto dall'azienda ai propri fornitori, per uno specifico modello di vaso, dal momento che questo varia anche per il medesimo codice-prodotto. Questa assunzione è stata estesa anche alle *tolleranze ammesse*.

Pertanto, per ciascuna tipologia di vaso, in Tabella 16 sono riportati i valori medi dei *valori tipici* e delle tolleranze.

Tabella 16: Requisiti dimensionali e meccanici.

Codice prodotto	Imboccatura [mm]	Capacità raso-bocca [ml]	Peso [g]	Resistenza all'impatto [inch/sec]	Resistenza al carico assiale [kg]	Resistenza allo shock termico [°C]
D01T000	58 (TO)	215 ± 3,0	145 ± 3,0	35	250	≥ 50
D01C800	63 (TO)	314 ± 4,0	168 ± 3,5	35	250	≥ 40
D01C900	70 (TO)	314 ± 3,3	174 ± 3,8	35	250	≥ 40
D01T200	58 (TO)	318 ± 4,0	189 ± 3,5	35	250	≥ 50
D014702	n.a.	370 ± 5,0	n.a. ± 3,5	35	250	≥ 40
D01T100	66 (TO)	318 ± 4,0	180 ± 3,5	35	250	≥ 50
D013701	58 (TO)	215 ± 3,0	140 ± 3,0	35	250	≥ 50
D013801	66 (TO)	215 ± 3,0	145 ± 3,0	35	250	≥ 50
D01G000	66 (TO)	215 ± 3,0	150 ± 3,0	35	250	≥ 50
D0138DP	66 (TO)	228 ± 3,0	151 ± 3,0	35	250	≥ 50
D014702	63 (TO)	370 ± 5,0	170 ± 3,5	35	250	≥ 50
D014701	66 (TO)	375 ± 5,0	215 ± 3,5	35	250	≥ 50
D015302	63 (TO)	448 ± 5,0	250 ± 3,5	35	250	≥ 50
D015102	66 (TO)	585 ± 5,0	298 ± 4,0	35	250	≥ 50
D014001	66 (TO)	318 ± 4,0	180 ± 3,5	35	250	≥ 50
D011803	48 (TO)	106 ± 2,5	90 ± 2,5	35	250	≥ 50
D01DP00	66 (TO)	327 ± 4,0	187 ± 3,5	35	250	≥ 50
D014601	66 (TO)	375 ± 4,0	190 ± 3,5	35	250	≥ 50
D01T300	63 (TO)	380 ± 5,0	205 ± 3,5	35	250	≥ 50
D01D800	70 (TO)	580 ± 5,0	270 ± 4,0	35	250	≥ 50
D011801	48 (TO)	106 ± 2,5	92 ± 2,5	35	250	≥ 50

In riferimento alle proprietà fisiche dei vasi, *Saclà* richiede il soddisfacimento di specifici requisiti per quanto riguarda i trattamenti superficiali dei vasi, le caratteristiche cromatiche e lo spessore del vetro [6]. In particolare:

- I vasi devono essere sottoposti a trattamenti della superficie idonei a garantire la resistenza ai graffi anche dopo la pastorizzazione e i prodotti utilizzati per i trattamenti devono essere compatibili con la destinazione d'uso del vaso in vetro, ovvero non devono essere utilizzate sostanze potenzialmente tossiche.

- I trattamenti non devono lasciare tracce evidenti all'interno delle confezioni, né macchie sulla superficie esterna;
- I trattamenti ed i prodotti utilizzati non devono influire in alcun modo sulle caratteristiche degli alimenti contenuti nei vasi trattati;
- Per i trattamenti superficiali ad alta temperatura devono essere usati: meno di 20 Cumulative Thermal Units (CTU) sulla rifinitura dei vasetti TO; meno di 10 CTU sulla rifinitura dei vasetti PT;
- Devono essere evitati riscaldamenti eccessivi durante il trattamento superficiale, dal momento che essi potrebbero causare un aumento della “coppia” di apertura, problemi nell'applicazione della capsula e ossidazione dei denti della capsula stessa.

Per il vetro è, quindi, disposto il colore bianco e un *valore tipico* per lo spessore $\geq 1,3$ mm.

6.3 Il controllo in accettazione dei vasi

Al fine di poter comprendere al meglio quanto riportato nel seguente paragrafo è, dapprima, necessario introdurre una serie di concetti [6]:

- *Unità di prodotto*: indica il singolo vaso in vetro;
- *Unità di consegna*: il quantitativo di unità di prodotto dello stesso codice articolo contenuta in un unico imballo primario (bancale completo);
- *Lotto di produzione*: il numero di unità di consegna dello stesso codice articolo, di caratteristiche omogenee, provenienti da un dato fornitore;
- *Carico*: il numero di unità di consegna dello stesso codice articolo presenti sull'automezzo;
- *Campagna produttiva*: l'insieme di più lotti di produzione consecutivi dello stesso codice articolo, di caratteristiche omogenee, provenienti da un dato fornitore;
- *Unità di prelievo*: unità di consegna che si considera rappresentativa del carico ai fini del prelievo.

Il *Controllo in Accettazione* [56] dei vasi ha inizio con il ricevimento dell'automezzo inviato dalle Vetriere sul piazzale di scarico. L'operatore addetto, dopo aver verificato la corrispondenza fra l'ordine emesso da Saclà e quanto dichiarato dal *Documento di Trasporto (DdT)*, esegue i controlli sull'automezzo e sul *carico* al fine di verificare l'integrità delle strutture interne del veicolo e degli imballi. In questa fase preliminare è, quindi, possibile

individuare le prime non conformità sulle *unità di consegna*, tra cui la presenza di eventuali vasi rotti. Nel caso di non conformità, l'operatore provvede ad annotare sul modulo *D.R. PIA 01.02* e sul *DdT* la segnalazione di quanto riscontrato e ad avvisare il fornitore tramite e-mail allegando la foto del difetto riscontrato, la copia scannerizzata del *DdT* e la copia del *DR PIA 01.02*.

Pertanto, all'interno del proprio Capitolato Tecnico [6], *Saclà* individua sei tipologie di non conformità:

- Le palette visibilmente danneggiate;
- Difetti critici: difetti che possono provocare danni al consumatore;
- Difetti primari: difetti che possono provocare deterioramento del prodotto;
- Difetti maggiori: difetti che possono provocare interruzione sulle linee di riempimento;
- Difetti minori: difetti di natura esclusivamente estetica, tali da non causare inconvenienti di riempimento e di impiego;
- Non conformità meccaniche e dimensionali.

Una volta ultimate le operazioni di scarico dell'autotreno, da ogni *lotto di produzione* di ciascun fornitore sono prelevati due vasi, da due differenti pallet, da cui ricavare le informazioni necessarie per definire un *lotto informatico*, ovvero il lotto digitale rappresentativo del *lotto di produzione*.

Terminata la creazione del *lotto informatico*, si procede all'identificazione dei pallet da sottoporre al processo di *Controllo Qualità*, ovvero a selezionare le *unità di prelievo*. In particolare, per ogni tipologia di non conformità da testare *Saclà* imposta un piano di collaudo per attributi secondo la norma *UNI ISO 2859:2007* [57], le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 17.

Tabella 17: piani di collaudo. Fonte: *Saclà* [6]

CLASSE DI NON CONFORMITA'	LIVELLO QUALITÀ ACCETTABILE (AQL)	PIANO DI CAMPIONAMENTO	TIPO DI COLLAUDO	LIVELLO DI COLLAUDO
1. PALETTE VISIBILMENTE DANNEGGIATE	0	--	--	--
2. DIFETTI CRITICI	0.015	Semplice	Ordinario	II
3. DIFETTI PRIMARI	0.400	Semplice	Ordinario	II
4. DIFETTI MAGGIORI	0.650	Semplice	Ordinario	II
5. DIFETTI MINORI	2.500	Semplice	Ordinario	II
6. NC MECCANICHE E DIMENSIONALI:	0.400	Semplice	Speciale	S-3

Il numero di *unità di prelievo* da cui ricavare il campione di *unità di prodotto* è stabilito in conformità alla norma *UNI ISO 2859:2007* [57]. La scelta delle palette è casuale, escludendo, tuttavia, quelle visibilmente danneggiate.

Per semplicità, all'interno della Tabella 18 è riportata una parte dei risultati della procedura, cioè il numero di *unità di prelievo* da selezionare, dato il numero di pallet costituenti il *lotto di produzione*.

Tabella 18: determinazione delle unità di prelievo

Numero di pallet per lotto di produzione	Numero di unità di prelievo
<i>Fino a 1 pallet</i>	<i>Sempre 1</i>
<i>Da 2 a 8</i>	2
<i>Da 9 a 15</i>	3
<i>Da 16 a 25</i>	5
<i>Da 26 a 50</i>	8
<i>Da 51 a 90</i>	13
<i>Da 91 a 150</i>	20

Individuati i pallet, prima di sottoporre al controllo visivo i vasi in essi contenuti, sono, pertanto, raccolti tutti i dati necessari per l'identificazione delle *unità di prelievo*:

- Codice univoco SSCC, che consente al fornitore di tracciare il pallet;
- Data di produzione del pallet;
- Turno di produzione del pallet (quando presente);
- Ora di produzione del pallet (quando presente);
- N° progressivo del pallet;
- Lotto di produzione del pallet;
- Linea di produzione.

Una volta identificate le *unità di prelievo*, ogni pallet è aperto e, in base al quantitativo di vasi consegnati per ogni *lotto di produzione*, sono prelevati i vasi da sottoporre al controllo visivo. Anche il prelievo del campione rappresentativo avviene secondo quanto prescritto dalla norma *UNI ISO 2859:2007* [57], suddividendo la numerosità del campione stesso per il numero di *unità di prelievo* individuate. Anche in questo caso il prelievo del campione è eseguito prelevando casualmente le *unità di prodotto*.

All'interno della Tabella 19 è riportata una parte dei risultati della procedura, cioè il numero di *unità di prodotto* da selezionare, dato il numero di vasi costituenti il *lotto di produzione*.

Tabella 19: determinazione delle unità di prodotto

Numero di vasi per lotto di produzione	Numero di unità di prodotto
Da 1201 a 3200	125
Da 3201 a 10000	200
Da 10001 a 35000	315
Da 35001 a 150000	500
Da 150001 a 500000	800

A questo punto, da ogni pallet selezionato sono prelevati in coppie i vasi da sottoporre al controllo visivo, nel quantitativo previsto dal piano di campionamento.

Presso il laboratorio, le coppie di vasi sono posizionate su un piano e fatte ruotare di fronte a uno schermo luminoso al fine di individuare eventuali difetti di fabbricazione, siano essi minori o di maggiore entità, o la presenza di corpi estranei, quali frammenti di vetro, insetti o altri elementi.

Successivamente, dai contenitori sottoposti al controllo visivo sono prelevati 32 vasi per effettuare le verifiche dimensionali e meccaniche. In particolare, i controlli effettuati da *Saclà* riguardano la verticalità, l'altezza, il parallelismo bocca-fondo, la resistenza all'urto, il peso e la capacità dei vasi. Dunque, i risultati ottenuti da queste misurazioni sono confrontati con i valori riportati sul disegno tecnico fornito dal produttore.

Per quanto riguarda la prova di resistenza all'urto, questa è svolta in conformità rispetto a quanto previsto dalla normativa (*UNI 9302:1988*) [29]. In particolare, come richiesto dalla *Scheda Tecnica* sottoposta ai fornitori, è testata la resistenza allo stress massimo che potrebbero subire i vasi durante le varie fasi del processo produttivo (35 inch/sec). Solitamente, la prova è eseguita sul punto di contatto del vaso ove è più difficoltoso per il fornitore verificare lo spessore del vetro, tenendo il vaso capovolto sul piattello. Una volta assestato il primo colpo, il vaso è ruotato di 90° sull'asse verticale, quindi si procede con un secondo colpo. Al termine della prova, il risultato è registrato nel seguente modo: 0 quando la prova risulta conforme e 1 nel caso di rottura/prova non conforme.

Per quanto riguarda la verifica del peso dei vasi, questa ha l'obiettivo di evidenziare il peso minimo, il peso massimo, il peso medio e la differenza riscontrata fra peso minimo e peso massimo tra i 32 campioni sottoposti ad analisi.

Infine, la verifica della capacità del vaso si svolge come stabilito dalla Norma *BS EN ISO 8106:2004* [27] e ha l'obiettivo di stabilire i valori massimi, minimi e medi della capacità dei 32 campioni sottoposti a verifica, nonché la differenza fra capacità minima e massima riscontrate.

Al termine di queste verifiche, una volta riportati in formato digitale i risultati delle prove, il programma di Analisi fornisce la valutazione finale del lotto, determinandone l'accettazione o il rifiuto (se non conforme) sulla base del piano di collaudo preimpostato.

6.4 Le criticità

Come visto in letteratura, i fattori che influiscono maggiormente sulla potenziale rottura dei vasi sono lo spessore del fondo e delle pareti del vaso, i valori di resistenza all'impatto, di resistenza al carico assiale e allo shock termico, ma anche la geometria del contenitore, macroscopica e microscopica, e alcuni parametri dimensionali come l'altezza e il diametro del vaso.

Per quanto riguarda i parametri dimensionali e meccanici, l'attuale prassi aziendale di adottare i *valori tipici* per definire le specifiche di prodotto, senza stabilire un proprio valore target, potrebbe comportare dei rischi non indifferenti in termini di affidabilità del prodotto. Infatti, basarsi esclusivamente sui parametri comunicati dai fornitori porta l'azienda a dipendere in modo sostanziale dalle informazioni esterne, nonché a perdere il controllo diretto sui parametri critici che influenzano la qualità e la conformità del prodotto finale. Tale criticità è, inoltre, amplificata dal fatto che *Saclà* non ha implementato nel corso del tempo delle procedure per la verifica di questi parametri, se non per la capacità, il peso, e la resistenza all'impatto. In particolare, per lo spessore del vetro, la resistenza al carico assiale e allo shock termico, per la verticalità, la planarità della bocca, il parallelismo bocca-fondo, l'ovalizzazione del corpo e la superficie interna totale (inclusa la bocca del vaso), i valori effettivi rispetto a uno specifico vaso restano informazione confidenziale dei fornitori, in quanto non direttamente condivisi né attraverso i disegni tecnici né attraverso opportuni allegati alle *Scheda Tecnica*.

Dal punto di vista dimensionale e geometrico, per i *Vasi Standard*, resta ambiguo se i principi guida delineati dalla norma *BS ISO 9058:2008* [24] per la definizione delle tolleranze di altezza, verticalità, diametro, parallelismo bocca-fondo e capacità siano applicati a tutti questi parametri o unicamente a capacità, verticalità e parallelismo bocca fondo, come specificato nella documentazione fornita da *Saclà* e come riportato nel paragrafo **6.2 - I requisiti dei vasi di vetro**. Tale considerazione, si estende, inoltre, all'altezza e al diametro dei *Vasi Personalizzati*.

Inoltre, dall'analisi dei disegni tecnici forniti, si rileva che alcune caratteristiche sono prive dei valori di tolleranza e che:

- le tolleranze indicate dai fornitori per il diametro massimo del corpo sono o conformi a quanto specificato dalla norma *BS ISO 9058:2008* [24] o più piccole.
- le tolleranze indicate dai fornitori per l'altezza sono o conformi a quanto specificato dalla norma *BS ISO 9058:2008* [24] o più piccole, fatta eccezione per i vasi:
 - D011803 prodotto da *Saint-Gobain Vetri S.p.A*: In questo caso il disegno riporta una tolleranza di 1 mm a fronte di una tolleranza secondo norma di 0,92 mm, calcolata a partire dalla formula (4.4.1) con una altezza nominale di 80,5 mm.
 - D0138DP prodotto da *Saint-Gobain Vetri S.p.A*: In questo caso il disegno riporta una tolleranza di 1 mm a fronte di una tolleranza secondo norma di 0,92 mm, calcolata a partire dalla formula (4.4.1) con una altezza nominale di 79,5 mm.
 - D011801 prodotto da *Vebad S.p.A*: In questo caso il disegno riporta una tolleranza di 1 mm a fronte di una tolleranza secondo norma di 0,93 mm, calcolata a partire dalla formula (4.4.1) con una altezza nominale di 82 mm.
 - D01C900 prodotto da *Zignago Vetro S.p.A.*: In questo caso il disegno riporta una tolleranza di 1,10 mm a fronte di una tolleranza secondo norma di 0,96 mm, calcolata a partire dalla formula (4.4.1) con una altezza nominale di 89,6 mm.
- le tolleranze indicate dai fornitori per la capacità raso bocca sono o conformi a quanto specificato dalla norma *BS ISO 9058:2008* [24] o più piccole, fatta eccezione per i vasi:

- D01T200 prodotto da O-I: In questo caso il disegno riporta una tolleranza di 6,5 ml a fronte di una tolleranza secondo norma di 6,36 ml, calcolata a partire dai riferimenti presenti in Tabella 1 con una capacità nominale di 318 ml.
- D01T100 prodotto da O-I: In questo caso il disegno riporta una tolleranza di 6,5 ml a fronte di una tolleranza secondo norma di 6,36 ml, calcolata a partire dai riferimenti in Tabella 1 con una capacità nominale di 318 ml.
- D01T100 prodotto da *Zignago Vetro S.p.A.*: In questo caso il disegno riporta una tolleranza di 6,5 ml a fronte di una tolleranza secondo norma di 6,36 ml, calcolata a partire dai riferimenti in Tabella 1 con una capacità nominale di 318 ml.

Inoltre, in accordo con quanto specificato dalla norma *ATM C224 – 78* la dimensione del campione attualmente utilizzata per condurre i test meccanici e di verifica dimensionale non sembrerebbe adeguata. Infatti, come approfondito nella sezione **4.4.11 ASTM C224 – 78 Standard Practice for Sampling Glass Containers**, affinché i risultati delle prove siano affidabili è necessario affidarsi alla norma *MIL-STD-105E* [34] per il corretto dimensionamento del campione. In particolare, *Saclà* dimensiona correttamente il campione per il controllo visivo, ma all'interno di questo sample preleva solo 32 vasi per condurre i test meccanici e dimensionali. La norma *ASTM C224 – 78* non esclude di poter svolgere le prove dimensionali e meccaniche su vasi per cui sono già state effettuate altre tipologie di verifiche (se queste verifiche non hanno compromesso le caratteristiche del vaso), ma consente di stabilire in modo arbitrario la dimensione del campione solo per quei casi non specificati dalla *MIL-STD-105E* [34].

Infine, non sono condotte prove per testare la superficie dei vasi. In particolare, questo tipo di verifica consentirebbe di individuare eventuali graffi o cricche sulla superficie interna ed esterna del vaso, solitamente responsabili della degradazione del contenitore nel tempo e correlate a un aumento della sua probabilità di frattura.

6.5 Le proposte

Probabilmente, i motivi per cui *Saclà* utilizza un campione di 32 *unità di prodotto* per condurre le verifiche dimensionali e meccaniche dei vasi sono riconducibili alla necessità di ottimizzare risorse, tempi e costi. In particolare, la riduzione del numero di campioni consente di abbattere i costi di tipo operativo, vista la minore quantità di materiali,

attrezzature e personale coinvolti per i test, generando, così, un significativo risparmio economico. Tali considerazioni diventano ancora più rilevanti se si considera che alcune verifiche richiedono attrezzature specifiche e personale qualificato per poter essere eseguite. Inoltre, esaminare campioni limitati consente di ottenere risultati più velocemente, senza rallentare i ritmi di produzione, elemento essenziale nei settori ad alta intensità produttiva come quello alimentare.

Pertanto, al fine di ottimizzare il processo di controllo qualità, si potrebbe valutare l'implementazione di un sistema di fotocamere a scansione lineare direttamente sulla linea di riempimento dei vasi, per effettuare le verifiche dimensionali e geometriche. Come ampiamente discusso nel sottoparagrafo **5.1.1 Le fotocamere a scansione lineare**, infatti, le fotocamere a scansione lineare costituiscono una soluzione efficace per il controllo inline dei contenitori in vetro di medie dimensioni di sezione cilindrica, dal momento che esse permettono di eseguire i controlli ad alta velocità fornendo, allo stesso tempo, risultati altamente precisi.

L'implementazione del sistema a fotocamere lineari consentirebbe, quindi, sia di monitorare in tempo reale la totalità dei vasi, individuando in modo tempestivo gli articoli non conformi, sia di ottenere le misure effettive dei contenitori utilizzati. Tali informazioni potranno, quindi, essere confrontate con le caratteristiche riportate dai fornitori nelle schede tecniche e i nei disegni tecnici.

Parallelamente, sarebbe comunque opportuno effettuare delle analisi di laboratorio per testare la resistenza al carico assiale e allo shock termico, nonché mantenere le prove per la resistenza all'urto. In particolare, per ciascuna di queste prove la dimensione del campione (N) andrebbe definita nel seguente modo:

- Resistenza al carico assiale: in conformità a quanto specificato dalla norma *MIL-STD-105E* [34], vista l'implementazione di un piano di campionamento per attributi;
- Resistenza allo shock termico: secondo la norma *ASTM C224 – 78* [31], ovvero in conformità a quanto specificato dalla norma *MIL-STD-105E* [34] vista l'implementazione di un piano di campionamento per attributi;
- Resistenza all'urto: in conformità a quanto specificato dalla norma *MIL-STD-105E* [34], vista l'implementazione di un piano di campionamento per attributi, con $N \geq 10$ in accordo con quanto prescritto dalla norma *BS EN 12980:2000* [28].

Infine, potrebbe essere interessante effettuare un'analisi della superficie dei vasi, come quella descritta nel prossimo paragrafo che, di fatto, costituisce l'attività sperimentale a corredo della presente tesi.

6.6 L'attività sperimentale

In questa sezione è descritta l'attività di caratterizzazione della texture superficiale di 1 vaso in vetro a partire dalle misurazioni eseguite mediante *AFM* sulla parte esterna del fondo e della parete verticale. Le misure, effettuate in tapping mode con selezione dei filtri secondo le norme *ISO 25178-2* [58] e *ISO 25178-3* [59], raccolgono i parametri di altezza replicati 2 volte.

Pertanto, dal valore di questi parametri è stato possibile caratterizzare la rugosità superficiale del vaso.

Come mostrato in Tabella 20, l'area scansionata copre una superficie di $2,5 \mu\text{m} \times 2,5 \mu\text{m}$. In particolare, sia sull'asse X sia sull'asse Y la scansione è stata divisa in 256 punti con uno spazio tra un punto e l'altro di 9.8 nm. Tuttavia, mentre sull'asse X la scansione inizia nel punto di origine dell'asse (Offset 0), sull'asse Y questa è spostata di $-2.5 \mu\text{m}$ rispetto all'origine, ovvero l'area scansionata inizia $2.5 \mu\text{m}$ sotto l'origine dell'asse.

Tabella 20: dettagli della scansione

Identity card			
Name:	110648_FondoEsterno > Line by line leveled		
Axis: X			
Length:	2.50	μm	
Size:	256	points	
Spacing:	9.80	nm	
Offset:	0.00	μm	
Axis: Y			
Length:	2.50	μm	
Size:	256	lines	
Spacing:	9.80	nm	
Offset:	-2.5	μm	

6.6.1 Il fondo

La Figura 30 mostra l'immagine della scansione. I parametri oggetto di interesse sono stati l'altezza quadratica media (Sq), l'altezza media (Sa), l'asimmetria (Ssk), la curtosi (Sku), l'altezza massima del picco (Sp), l'altezza massima della depressione (Sv) e l'altezza massima della superficie (Sz) [54].

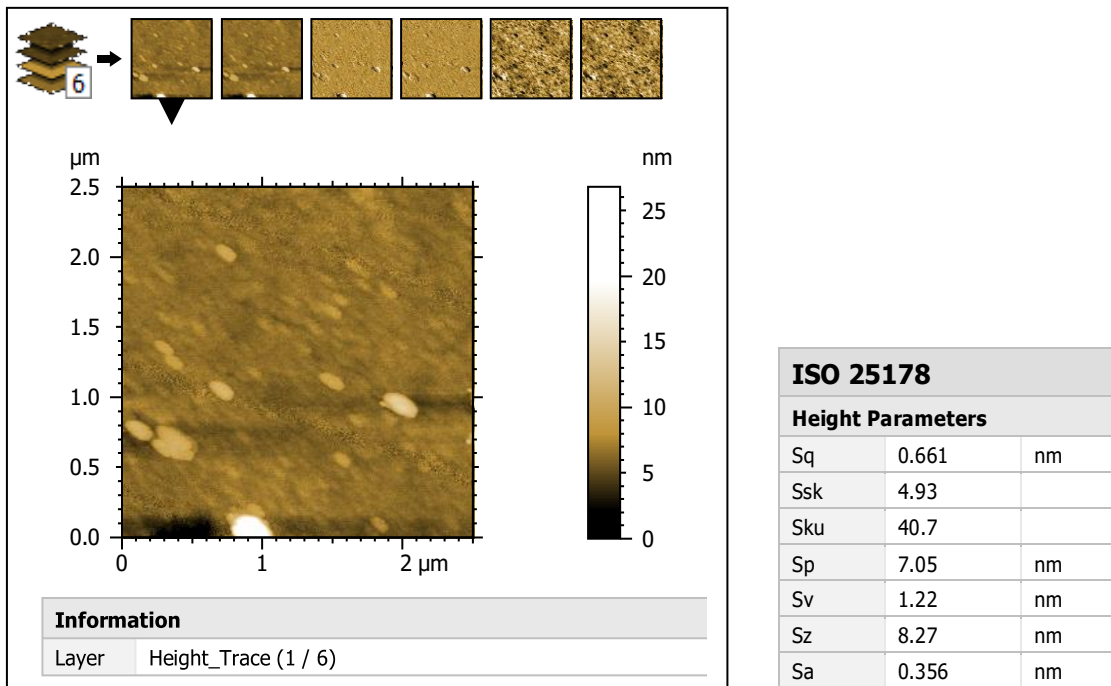


Figura 30: fondo

Dal momento che Sq rappresenta la deviazione standard dell'altezza dei punti della superficie rispetto alla media, un valore di 0.661 nm indica una superficie molto liscia, con variazioni minime rispetto al piano medio.

Un'altezza media Sa di 0.356 nm suggerisce una superficie levigata e uniforme.

Per quanto riguarda l'asimmetria, Ssk descrive la forma della distribuzione dell'altezza della topografia, misurando la simmetria del profilo rispetto alla linea media. Per una superficie con una distribuzione di altezza casuale (o gaussiana) che presenta una topografia simmetrica, l'asimmetria è zero. Tuttavia, questo parametro non è in grado di distinguere se i picchi del profilo siano distribuiti uniformemente sopra o sotto il piano medio ed è

fortemente influenzato da picchi isolati o valli isolate [54]. Un valore pari a 4.93 suggerisce che la maggior parte del materiale sia sotto la linea media (asimmetria positiva).

Una superficie con una distribuzione di altezza gaussiana ha un valore di curtosi pari a 3. Pertanto, un valore di Sku pari a 40.7 rileva non solo un'area in cui i picchi non sono distribuiti uniformemente, ma suggerisce anche la presenza di una superficie spigolosa.

Dal momento che il parametro Sp rappresenta l'altezza massima del picco, ossia l'altezza del punto più alto della superficie, e che il parametro Sv rappresenta l'altezza massima della depressione, cioè l'altezza del punto più basso della superficie, ne consegue che il parametro Sz sia l'altezza massima della superficie, ovvero la somma dei valori assoluti di Sp e Sv . Infatti, essendo le altezze calcolate a partire dal piano medio, Sp è sempre positivo e Sv è sempre negativo. In particolare, il valore di Sp pari a 7.05 nm indica la presenza di un picco non trascurabile.

In conclusione, la superficie del fondo del vaso è caratterizzata dalla presenza di picchi accentuati e ben definiti, che contribuiscono a un profilo topografico asimmetrico e puntuale.

6.6.2 La parete verticale

La Figura 31 mostra l'immagine della scansione. Anche in questo caso, i parametri oggetto di misura sono stati l'altezza quadratica media (Sq), l'altezza media (Sa), l'asimmetria (Ssk), la curtosi (Sku), l'altezza massima del picco (Sp), l'altezza massima della depressione (Sv) e l'altezza massima della superficie (Sz) [54].

Diversamente rispetto a quanto osservato per il fondo, la parete verticale presenta una superficie leggermente irregolare, come indicato dal valore di Sq , pari a 2.57 nm. Inoltre, anche il valore di Sa risulta più elevato, sebbene la superficie appaia comunque relativamente uniforme, pur non essendo completamente liscia.

Il valore positivo dell'asimmetria (2.30) e la curtosi (15.2) indicano rispettivamente che la maggior parte del materiale si trova sotto la linea media e la presenza di una superficie leggermente spigolosa.

Di particolare interesse sono i valori di Sp , Sv e Sz . Nello specifico, Sp (16.5 nm) risulta essere quasi il doppio di Sv (9.65 nm). Ciò evidenzia la presenza di un picco notevole e di una depressione altrettanto rilevante.

In conclusione, la superficie della parete verticale mostra delle irregolarità evidenti con una predominanza di picchi.

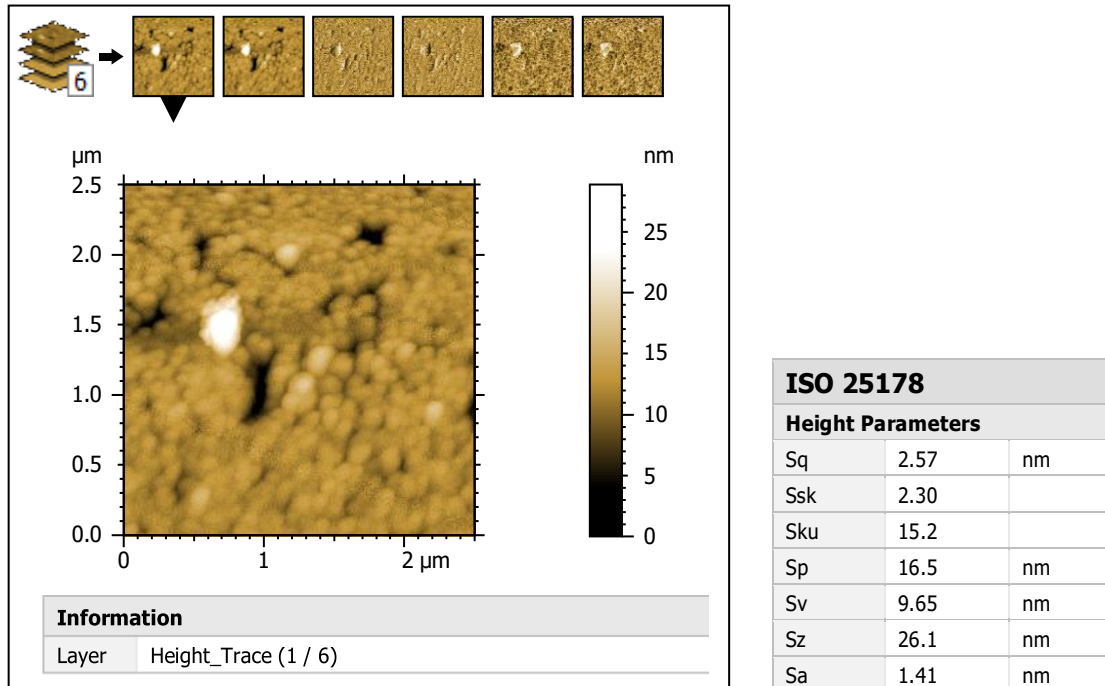


Figura 31: parete verticale

6.6.3 I risultati

I risultati delle misure condotte sul fondo e sulla parete verticale del vaso evidenziano la presenza di irregolarità che potrebbero compromettere la durabilità del prodotto. Infatti, i picchi sulla superficie potrebbero comportare una maggiore usura dell'articolo durante la manipolazione, nonché fungere da punti di concentrazione delle tensioni responsabili di un aumento della probabilità di frattura

7. Conclusioni

La revisione della letteratura, condotta riguardo la qualifica dimensionale e lo studio del processo produttivo dei vasi in vetro per l'industria agroalimentare, ha permesso di individuare i requisiti tecnici e qualitativi richiesti per questi contenitori, evidenziando, inoltre, nuovi approcci per la verifica delle loro caratteristiche e per l'individuazione delle non conformità, al fine di incrementare la sostenibilità e l'efficienza dei processi ad essi connessi.

In particolare, dall'indagine condotta emergono significative lacune normative: attualmente, non esistono Direttive e Regolamenti nazionali e internazionali rivolti in modo specifico ai vasi in vetro. Le norme esistenti, infatti, si limitano a trattare in termini generali i contenitori destinati al contatto con gli alimenti, senza prevedere standard o parametri mirati esclusivamente per vasi in vetro. Questo vuoto normativo sottolinea l'esigenza di una regolamentazione più specifica, che possa supportare adeguatamente il settore agroalimentare nell'adozione di pratiche conformi e sicure per l'utilizzo dei vasi in vetro, per cui, tra l'altro, gli Standard tecnici già offrono delle chiare linee guida.

A partire da queste evidenze, l'analisi condotta sul *caso studio* ha contribuito a chiarire come la letteratura specialistica offra già fondamentali spunti metodologici per impostare un sistema di controllo qualità dei vasi in vetro in modo strutturato e soddisfacente. In particolare, tale studio è stato condotto con l'obiettivo di indagare alcune delle principali cause alla base dei fenomeni di rottura dei vasi, dal momento che questo aspetto, ad oggi, rappresenta una delle principali criticità per il settore del vetro per l'uso agroalimentare, con ripercussioni significative sull'integrità del prodotto finale. La letteratura, dunque, si configura come una risorsa essenziale per definire approcci sistematici e strategie di intervento che possano intercettare le non conformità e i difetti alla base di tale problematica.

Parallelamente, però, la presente tesi ha messo in luce come l'analisi dimensionale dei vasi in vetro per il packaging alimentare costituisca un tema complesso, che richiede competenze tecniche e trasversali per poter essere affrontato in modo adeguato.

Dal punto di vista metodologico, infatti, il principale limite del presente lavoro consiste nella natura circoscritta dello studio. Questo si è focalizzato sulle caratteristiche del prodotto e sui relativi processi di controllo qualità, tralasciando, tuttavia, lo studio di quelle situazioni al

contorno che possono influire sull'affidabilità del vaso. Lo studio di fattori quali la movimentazione, il trasporto o lo stoccaggio dei vasi, nonché le tecnologie e le materie prime con cui il prodotto stesso è realizzato, risalendo verso monte della supply chain, risultano essenziali per una valutazione completa del tema. È chiara, quindi, la necessità di effettuare ulteriori approfondimenti.

In definitiva, il lavoro svolto ha evidenziato l'importanza della verifica dimensionale per i vasi in vetro a contatto con gli alimenti, contribuendo a chiarire alcuni aspetti del tema con implicazioni che possono risultare utili soprattutto per professionisti del settore.

Bibliografia e Sitografia

- [1] R. Coles, D. McDowell, M. J. Kirwan, *Food Packaging Technology*, Blackwell Publishing Ltd, 2003, pp 152-173.
- [2] G. L. Robertson, *Food Packaging Principles and Practice, Third Edition*, Taylor & Francis Group, pp 229-241
- [3] Saint-Gobain Vetri, *Presentazione Tecnica Saint-Gobain VETRI*.
- [4] Saint-Gobain Vetri, *Meeting SACLA' Saint-Gobain Vetri VETRO e PROCESSO*, 2008.
- [5] Saclà, *SCEHDA Elenco Difetti sui Contenitori*.
- [6] Saclà, *Capitolato Tecnico*, 2007.
- [7] Bucher Emhart Glass, *Difetti dei contenitori di vetro Cause e rimedi*, 2024.
- [8] The British Standards Institution, *BS EN ISO 17450-1:2011 Geometrical product specifications (GPS) — General concepts*, 2012.
- [9] The British Standards Institution, *BS EN ISO 1101:2017 Geometrical product specifications (GPS) — Geometrical tolerancing — Tolerances of form, orientation, location and run-out*, 2020.
- [10] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, *UNI EN 29009:1996 Contenitori di vetro - Altezza e non parallelismo della bocca con riferimento alla base del contenitore – Metodi di prova*, 1996.
- [11] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, *UNI EN 29008:1996 Bottiglie di vetro – Verticalità – Metodo di prova*, 1996.
- [12] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, *UNI EN 29885:1996 Contenitori di vetro a bocca larga - A Scostamento dalla planarità della superficie di tenuta superiore – Metodi di prova*, 1996.
- [13] The British Standards Institution, *BS ISO 24118-1:2023 Paper and board — Stylus contact method*, 2023.
- [14] G. Malucelli, *Materiale del corso di Scienza e Tecnologia dei Materiali*, 2020.
- [15] Commissione europea, *REGOLAMENTO (CE) N. 2023/2006 sulle buone pratiche di fabbricazione dei materiali e degli oggetti destinati a venire a contatto con prodotti alimentari*, 2006.
- [16] Parlamento europeo e Consiglio dell'Unione Europea, *REGOLAMENTO (CE) N. 852/2004 sull'igiene dei prodotti alimentari*, 2021
- [17] Parlamento europeo e Consiglio dell'Unione Europea, *REGOLAMENTO (CE) N. 1935/2004 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO riguardante i materiali e gli oggetti destinati a venire a contatto con i prodotti alimentari*, 2021.

- [18] Parlamento europeo e Consiglio dell'Unione Europea, *REGOLAMENTO (CE) N. 1907/2006 concernente la registrazione, la valutazione, l'autorizzazione e la restrizione delle sostanze chimiche (REACH)*, 2024.
- [19] U.S. Food and Drug Administration, *Code of Federal Regulations: Title 21*, 2024.
- [20] 75th United States Congress, *Federal Food, Drug and Cosmetic Act*, 1938.
- [21] 89th United States Congress, *Fair Packaging and Labeling Act*, 1966.
- [22] Ministero della sanità, *D.M.S. 26/04/1993*, 1993.
- [23] Consiglio dei Ministri, *D.L. n.29 del 10/02/2017*, 2018.
- [24] The British Standards Institution, *BS ISO 9058:2008 Glass containers — Standard tolerances for bottles*, 2008.
- [25] The British Standards Institution, *BS EN ISO 8113:2004 Glass containers — Resistance to vertical load — Test method*, 2004.
- [26] The British Standards Institution, *BS EN ISO 7459:2004 Glass containers — Thermal shock resistance and thermal shock endurance — Test methods*, 2004.
- [27] The British Standards Institution, *BS EN ISO 8106:2004 Glass containers — Determination of capacity by gravimetric method — Test method*, 2004.
- [28] The British Standards Institution, *BS EN 12980:2000 Materials and articles in contact with foodstuffs — Non-metallic articles for catering and industrial use — Method of test for the determination of impact resistance*, 2000.
- [29] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, *UNI 9302:1988 Contenitori di vetro — Determinazione della resistenza all'urto*, 1988.
- [30] ASTM International, *ASTM C149 – 14 Standard Test Method for Thermal Shock Resistance of Glass Containers*, 2020.
- [31] ASTM International, *ASTM C224 – 78 Standard Practice for Sampling Glass Containers*, 2020.
- [32] CE.T.I.E., *DT 02.00 – Standard tolerances for glass bottle*, 1996.
- [33] Consiglio dell'Unione Europea, *Direttiva 75/107/CEE*, 1974.
- [34] US Department of defense, *MIL-STD-105E*, 1963.
- [35] D. G. Caldwell, *Robotics and Automation in the Food Industry: Current and Future Technologies*, Elsevier Science & Technology, 2013 pp 75-108.
- [36] B. G. Batchelor, *Machine Vision Handbook, Volume 2*, Springer, 2012.
- [37] M. Kocon, M. Malesa, J. Rapcewicz, *Ultra-Lightweight Fast Anomaly Detectors for Industrial Applications*, 2024.
- [38] Malamas, E. N., Petrakis, E. G. M., Zervakis, M., Petit, L., & Legat, J. D. *A survey on industrial vision systems, applications and tools. Image and Vision Computing*, 2003 pp 171-188.

- [39] PCB Manufacturing & Assembly Services, *Basic Types of Machine Vision Robot System*.
- [40] V.N.Chougule, H.S.Gosavi, M.M.Dharwadkar, A.A.Gaind, *Review of Different 3D Scanners and Scanning Techniques*, 2018.
- [41] Ali Karami, Roberto Battisti, Fabio Menna, Fabio Remondino, *3D digitization of transparent and glass surfaces: state of the art and analysis of some methods*, 2022.
- [42] Gonen Eren et al. , Olivier Aubreton, Fabrice Meriaudeau, L.A. Sanchez Secades, David Fofi, A. Teoman Naskali, Frederic Truchetet, and Aytul Ercil, *A 3D Scanner for Transparent Glass*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009, pp 519-527.
- [43] Nishant Ojal, Alex Caviness, Alexander Blum, Brian Au, Adam W. Jaycox, Brian Giera, *Optimizing exposure times of structured light metrology systems using a digital twin*, 2024.
- [44] F. Artkin, *CMM Machines and Industrial Applications*, 2022.
- [45] Rohit Raju Nikam, *Coordinate Measuring Machine (Cmm)*, 2019.
- [46] Guanbin Gao, Huaishan Zhang, Xing Wu, and Yu Guo, *Structural Parameter Identification of Articulated Arm Coordinate Measuring Machines*, 2016.
- [47] S. Carmignato, W. Dewulf, R. Leach, *Industrial X-Ray Computed tomography*, Springer, 2018.
- [48] Wei Gao, *Metrology*, Springer, 2019.
- [49] Kruth JP, Bartscher M, Carmignato S, Schmitt R, Chiffre L De, Weckenmann A. *Computed tomography for dimensional metrology*. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2011.
- [50] De Chiffre L, Carmignato S, Kruth JP, Schmitt R, Weckenmann A. *Industrial applications of computed tomography*. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2014.
- [52] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, *UNI EN ISO 10360-2:2010 - pecifiche geometriche dei prodotti (GPS) - Prove di accettazione e prove di verifica periodica per macchine di misura a coordinate (CMM) - Parte 2: CMM utilizzate per misurazioni dimensionali lineari*, 2010.
- [53] D. Johnson, N. Hilal, W. R. Bowen, *Basic Principles of Atomic Force Microscopy*, Elsevier, 2009.
- [54] R. Leach, *Characterisation of Areal Surface Texture*, Springer, 2013.
- [55] CE.T.I.E., *DT 06.00 – Standard European tolerances for normal wide mouth glass jars*, 1998.
- [56] Saclà, *F.Ili Saclà – ASTI Controllo Accettazione Vasi*, 2008.
- [57] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, *UNI ISO 2859-1:2007 Procedimenti di campionamento nell'ispezione per attributi - Parte 1: Schemi di campionamento indicizzati secondo il limite di qualità accettabile (AQL) nelle ispezioni lotto per lotto*, 2007.

- [58] International Organization for Standardization, *ISO 25178-2:2021 Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: ArealPart 2: Terms, definitions and surface texture parameters*, 2021.
- [59] International Organization for Standardization, *ISO 25178-3:2012 - Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: ArealPart 3: Specification operators*, 2012.
- [60] Boyd D.C., Danielson P.S., Thompson D.A, *Glass*. In Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, John Wiley & Sons, 1994, pp. 555–628.
- [61] Bottero S.p.A., *Documentazione tecnica*.
- [62] Miroslav Kovacec, Ana Pilipovic, Nedeljko Stefanic, *Improving the quality of glass containers production with plunger process control*. In CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2010.
- [63] G. Scarinci, T. Toninato, B. Locardi, *Vetri*, Casa editrice Ambrosiana, 1977.
- [64] N.I. Min'ko, V. Mikhailovich Nartsev, *Factors Affecting the Strength of the Glass (Review)*, 2013.
- [65] Miyazaki, D., Ikeuchi, K.: *Inverse Polarization Raytracing: Estimating Surface Shapes of Transparent Objects*. In: IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition vol. 2, Springer, 2005, p. 910.
- [66] Miyazaki, D., Saito, M., Sato, Y., Ikeuchi, K.: *Determining surface orientations of transparent objects based on polarization degrees in visible and infrared wave lengths*. Journal of the Optical Society of America A 19(4), 2002, pp 687–694.
- [67] H. K. Surmen, *Photogrammetry For 3d Reconstruction Of Objects: Effects Of Geometry, Texture And Photographing*, 2023.
- [68] M. Kupiec, *Coordinated Measurement Systems Cmm And Cma – Characteristic And Methods Of Their Accuracy Evaluation*, 2012.
- [69] https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcR5GRucISspyXTDt44DVMzuhnQlx966g6Ff_qOoMcoHTMONKc-xtskq97Xe4eM4qqAgw&usqp=CAU
- [70] [https://www.etnamiele.it/public/2016/files/60ml%20cylindric%20jar\[1\].jpg](https://www.etnamiele.it/public/2016/files/60ml%20cylindric%20jar[1].jpg)
- [71] https://www.xrayconsult.it/images/Web-Wide-pictures-FF35CT_ProductShot_005_2022-1.jpg
- [72] Musgraves, Hu, Calvez, *Handbook of Glass*, Springer, 2019.

Ringraziamenti

Questa tesi è realizzata nell'ambito del progetto NODES, finanziato dal MUR sui fondi M4C2 - Investimento 1.5 Avviso "Ecosistemi dell'Innovazione", nell'ambito del PNRR finanziato dall'Unione europea- NextGenerationEU (Grant agreement Cod. n.ECS00000036).

Desidero esprimere il mio più sincero ringraziamento a tutte le persone che mi hanno accompagnato durante il percorso di studi e la scrittura di questa tesi, che dal principio alla fine sono stati un lavoro di squadra.

In primo luogo, un sentito ringraziamento al mio relatore, il Prof. Galetto, per avermi dato la possibilità di esplorare questo tema affascinante, ma al contempo a me sconosciuto. La scrittura di ogni capitolo di questa tesi è stata una vera scoperta. Un ringraziamento speciale anche al Dott. Maculotti e al Dott. Piovano, per la disponibilità, la professionalità e per il supporto ricevuti durante questi mesi di lavoro.

Un pensiero di gratitudine va alla mia famiglia, che mi ha sempre sostenuto in ogni fase di questo percorso, con grande discrezione. Grazie papà per avermi trasmesso l'importanza della perseveranza e della disciplina, grazie della fiducia e della pazienza.

Infine, un ringraziamento ai colleghi e agli amici, fonte di supporto, gioia e comprensione durante questo percorso. Care Compagnia d'Alta Quota, Bianca e Amina senza di voi questo viaggio accademico non sarebbe stato lo stesso.

Grazie a tutti voi per aver reso possibile il raggiungimento di questo traguardo.