

CAPITOLO III

TARATURA E VERIFICA DEI MISURATORI DI PORTATA E DEI CONTATORI DI VOLUME

3.1 Gli impianti di taratura dei misuratori di portata	85
3.2 I campioni di volume	96
3.3 Problematiche di taratura dei campioni di volume	98
3.4 Metodologie di taratura dei campioni di volume	100
3.3.1 Metodo gravimetrico	100
3.3.2 Metodo volumetrico o comparativo	107
Metodo volumetrico comparativo fine	107
Metodo volumetrico comparativo ordinario	109

3.1 Gli impianti di taratura dei misuratori di portata

La correttezza della misura effettuata da un misuratore di portata e/o da un contatore di volumi può essere garantita, come per tutti gli strumenti di misura, solo attraverso una periodica taratura dello strumento in uso, unica operazione in grado di ricavare e verificare nel tempo il legame (*funzione di trasferimento*) esistente tra il segnale in uscita, corrispondente alla grandezza da misurare ed il valore della grandezza in ingresso, senza che questo legame possa essere condizionato da eventuali grandezze di influenza. L'operazione di taratura può essere eseguita, in alcuni casi, anche prima della messa in esercizio su alcuni prototipi dello strumento, o su ogni singolo esemplare prodotto.

Essa viene eseguita applicando allo stadio di ingresso (sensore) uno o più valori noti della grandezza da misurare, e confrontando i valori di misura dello strumento in prova con quelli effettuati tramite uno strumento più accurato e comunque riferibile (detto campione), mantenendo costanti i valori delle possibili grandezze di influenza. Nel caso della grandezza portata il campione di misura è, di norma, costituito da un opportuno flusso di materia, generato e misurato in appositi impianti detti “impianti campione” o “impianti di taratura”, i quali, con configurazioni opportune delle tubazioni, possono essere indistintamente impiegati per la taratura di tutti i misuratori di portata (siano essi volumetrici, massici o contatori di volumi effluiti).

Relativamente alle condizioni di prova, è chiaro che, sia per motivi di funzionalità dell'organo di misura, sia per attribuire ai dati ottenuti la massima valenza, la taratura dei misuratori di portata dovrebbe essere eseguita sempre nelle effettive condizioni di esercizio (i.e. nello stesso campo di pressione e temperatura), ed utilizzando lo stesso fluido di lavoro. Se però si tiene conto di tutte le possibili applicazioni cui gli strumenti di misura della portata di fluidi sono destinati, in termini sia di campo di misura, di fluido di utilizzo e di condizioni operative, si comprende facilmente come le suddette prescrizioni per una corretta taratura non siano sempre nella pratica realizzabili, principalmente per il costo elevato di impianti specifici, oppure per motivi di sicurezza specie nel caso di utilizzo di fluidi che presentano rischi di esplosione o di contaminazione ambientale.

In alcuni di questi casi per la taratura dei misuratori di portata, sono disponibili fluidi di prova che hanno proprietà fisiche (in particolare viscosità e densità) abbastanza simili a quelle del fluido di effettivo impiego. Nella maggior parte dei casi, però, si è costretti a tarare i misuratori di portata mediante fluidi di prova chimicamente e fisicamente differenti da quelli di impiego, ad esempio acqua nel caso di misuratori per liquidi, o aria per misuratori di portate di gas. Nel caso di taratura con fluido sostitutivo, per poter attribuire una buona attendibilità ai dati, occorre eseguire la prova avendo cura che il parametro fisico considerato più significativo, assuma lo stesso valore che si verifica nelle condizioni effettive di esercizio. Per quanto riguarda gli impianti di taratura, si tratta, in genere, di impianti relativamente semplici dal punto di vista fenomenologico, che nascondono spesso una complessa realizzazione, soprattutto a causa delle dimensioni generose, necessarie a garantire un moto di efflusso stazionario per un intervallo significativo di tempo. La maggior parte di queste

strutture è ancora basata su tecnologie di misura tradizionali (si pensi alla lettura diretta e scomoda del livello di liquido raggiunto nel serbatoio campione), pur tuttavia in rapida evoluzione per rispondere da un lato alle crescenti esigenze di automazione delle tarature e di controllo di qualità della strumentazione di processo, dall'altro alla caratteristica di ripetibilità di alcuni misuratori di portata (come ad esempio le turbine) di gran lunga superiore alla massima accuratezza ottenibile nella maggior parte degli impianti.

Il fatto che i misuratori di portata costituiscano una delle più numerose e diversificate categorie di strumenti presenti sul mercato (vedi §2.1) rende evidente come anche per gli impianti destinati alla loro taratura non esista un'unica tipologia costruttiva.

Basti pensare che operando una suddivisione sulla base della grandezza misurata ed assunta a riferimento (campione) nel confronto con il sensore in prova, è possibile distinguere:

- ✓ *Impianti di taratura volumetrici*, sono impianti in cui la grandezza misurata è il volume di fluido effluo in un'unità di tempo. Si utilizzano a riguardo appositi serbatoi tarati (figura 3.1), con estremità inferiore di forma conica (angolo preferibilmente di 60°) per facilitare il drenaggio del liquido e ridurre l'ingresso di aria e dotati in corrispondenza del collo della sezione di misura di un vetro trasparente appositamente marcato in unità volumetriche.
- ✓ *Impianti di taratura massici*, detti anche gravimetrici, in cui la grandezza misurata è la massa di fluido effluo in un'unità di tempo, determinata mediante tecniche di tipo statico, o dinamico. In particolare, nella tipologia di tipo statico la massa di liquido che ha attraversato il misuratore in prova ed è stata raccolta nel serbatoio tarato viene determinata per semplice differenza delle letture di pesata dello stesso serbatoio, vuoto e pieno. Le letture andranno opportunamente corrette della spinta archimedeica e, qualora si è interessati alla misura del volume effluo in un'unità di tempo, divise per la densità (massa volumica) del liquido valutata alla temperatura (media) di prova. Nella tipologia di tipo dinamico il liquido attraversa continuamente il misuratore ed il serbatoio tarato e, solo al raggiungimento delle condizioni stazionarie, viene chiusa la valvola di scarico del serbatoio ed azionato il conteggio del tempo.

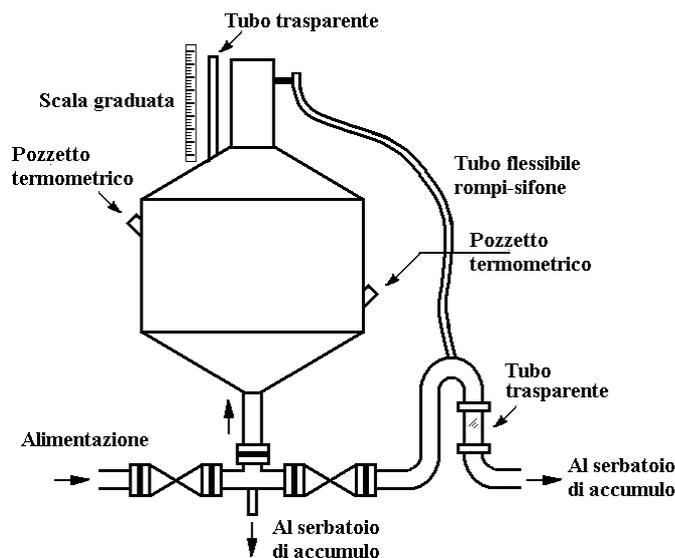


Figura 3.1 – Esempio di serbatoio campione di volume

Pur se è auspicabile l'utilizzo di queste tipologie di impianto per la taratura, rispettivamente, dei misuratori volumetrici o dei contatori (la prima tipologia) o dei misuratori massici (la seconda tipologia), ciò non sempre è possibile, soprattutto per le difficoltà realizzative di un impianto dedicato. In tal caso si accetta la conversione della grandezza misurata (dalla portata in massa a quella in volume, o viceversa) pur se questo comporta, inevitabilmente, una complicazione della catena di misura (è necessario misurare o calcolare la densità del fluido) e, di conseguenza, un peggioramento dell'incertezza totale di taratura.

In genere, la tipologia di impianto basata sul principio di misura della portata in massa è, decisamente, più semplice ed accurata per tarature di liquidi, il contrario si verifica per le tarature in mezzi gassosi. In particolare, la tipologia di tipo dinamico è particolarmente adatta per basse portate e misuratori caratterizzati da elevata frequenza del segnale di uscita, quali ad esempio, i misuratori a turbina. Tale tipologia di impianto è in grado di garantire una elevata automazione del processo di taratura. A portate più elevate, gli effetti inerziali tipici del sistema di pesata adottato possono generalmente introdurre errori considerevoli: ad esempio i sistemi di pesatura elettronici a celle di carico difficilmente possono vantare un'incertezza minore di $\pm 0,03\%$. In entrambe le tipologie, sia di tipo statico che dinamico, è possibile comunque raggiungere accuratèzze migliori adottando una tecnica di pesata per sostituzione. In tal caso, infatti, il campione di riferimento non è più lo strumento di pesata (bilancia) ma uno o più campioni di massa tarati ed equivalenti al serbatoio pieno di liquido.

Si tenga, infine, presente che anche nella più accurata misurazione della massa di liquidi è indispensabile tener conto sia della spinta archimedeica che si esercita sulla massa di liquido da pesare (a causa della loro bassa densità la spinta di Archimede sui liquidi risulta di quasi un ordine di grandezza maggiore di quella che si esercita, a parità di massa, sui campioni metallici utilizzati per la taratura del sistema di pesata), sia dell'evaporazione dal pelo libero dei serbatoi di pesata, o ancor di più della nebulizzazione da getti liquidi effluenti in atmosfera. Le correzioni da apportare nel caso si utilizzi acqua come fluido di taratura è stimata [42] pari a circa $+0,1\%$ per la spinta di Archimede mentre, di norma, è trascurabile (a temperatura ambiente) per quanto riguarda la seconda tipologia di fenomeni. Gli errori associati all'evaporazione del pelo libero di fluido, crescono decisamente nel caso si utilizzi un fluido diverso dall'acqua arrivando, con liquidi di prova molto volatili, ad errori di misura per difetto dell'ordine di alcune parti per mille. In tal caso, è decisamente consigliato l'uso di una metodologia di misura volumetrica in sistemi (impianti) chiusi all'atmosfera.

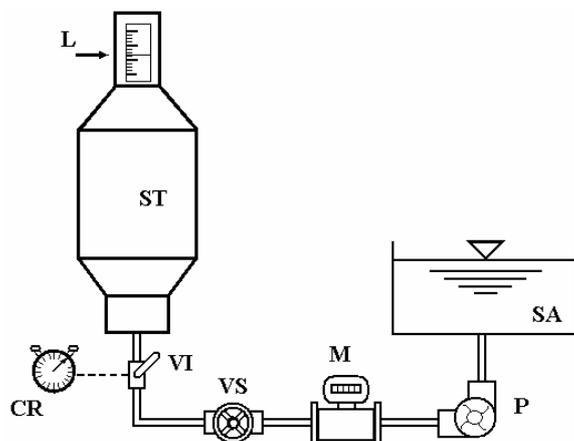
Se, anziché basarsi sulla tipologia di grandezza assunta a riferimento (portata massica o volumetrica), ci si basa sulla metodologia di misura della stessa, è possibile distinguere:

- ✓ *impianti di taratura primari*, in cui la portata è una grandezza ricavata *indirettamente* dalla misura della massa, o del volume, del fluido che attraversa lo strumento da tarare, e dell'intervallo di tempo di efflusso;
- ✓ *impianti di taratura secondari*, in cui la portata è una grandezza ricavata *direttamente* dalla lettura di un misuratore di portata campione (a sua volta tarato in un impianto di tipo primario), che sia caratterizzato da una accuratezza almeno cinque volte migliore di quella dello strumento in prova (Master meter).

La seconda soluzione è, decisamente, quella che minimizza i costi di installazione e di verifica dello stesso impianto (necessita della sola taratura periodica dello strumento campione) e può pertanto costituire la scelta migliore per le crescenti esigenze di automazione delle tarature e di controllo di qualità della strumentazione di processo.

Relativamente agli impianti di tipo primario, se ci si basa sul regime di moto del fluido che attraversa lo strumento da tarare e va a riempire, in un intervallo di tempo misurabile, una data capacità campione, è possibile distinguere:

- ✓ *impianti di taratura con inizio e fine prova con flusso nullo* (figura 3.2), in cui la prova è eseguita partendo e terminando in condizioni di impianto fermo;
- ✓ *impianti di taratura con inizio e fine prova con flusso a regime*, in cui la prova è eseguita partendo e terminando in condizioni di regime di moto stazionario.



Procedura schematica di funzionamento:

1. regolazione iniziale della portata mediante la pompa P e la valvola di strozzamento VS
2. inizio prova: apertura della valvola di intercettazione VI e azionamento del cronometro CR
3. il liquido attraversa lo strumento da tarare M e riempie il serbatoio tarato ST, inizialmente vuoto,
4. al raggiungimento del livello prestabilito L si chiude la valvola VI e viene arrestato il conteggio del tempo
5. si calcola la portata media dal rapporto fra la quantità di liquido accumulata e la durata della prova
6. si confronta il valore calcolato con quello indicato dallo strumento

Figura 3.2 – Impianto primario con inizio e fine prova a flusso nullo

La seconda tipologia di impianto è definita, ancora: di tipo *statico* (figura 3.3) se la grandezza misurata è il volume della capacità campione riempito in un intervallo di tempo noto; di tipo *dinamico* (figura 3.4) se la grandezza misurata è il tempo occorrente per riempire una capacità nota.

Negli impianti con inizio e fine prova con flusso nullo il conteggio del tempo comincia nell'istante di azionamento della pompa, senza attendere, quindi, il raggiungimento di condizioni di stazionarietà del flusso. E' evidente che i transitori iniziali e finali, cui saranno soggetti il misuratore e tutti gli organi del circuito di prova, tanto più influenzeranno il valore di portata media calcolata, quanto maggiore è il loro peso rispetto alla durata complessiva della prova (cioè quanto più breve è la prova stessa). La semplicità e, dunque, il basso costo iniziale di tali impianti potranno essere sfruttati a pieno solo per la taratura di misuratori con caratteristica poco sensibile alle variazioni di portata (come ad esempio per i contatori volumetrici) e, comunque, per prove di durata maggiore delle costanti di tempo degli strumenti in verifica.

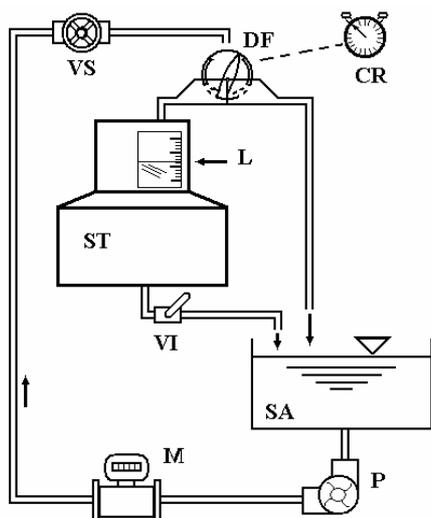


Figura 3.3 – Impianto primario (statico) con inizio e fine prova con flusso a regime

Procedura schematica di funzionamento:

1. regolazione iniziale della portata mediante la pompa P e la valvola di strozzamento VS
2. attesa delle condizioni di stabilità del flusso, il liquido ritorna sempre nel serbatoio di accumulo SA
3. inizio prova: azionamento del cronometro CR e deviazione del flusso mediante DF
4. il liquido attraversa lo strumento da tarare M e riempie il serbatoio tarato ST, inizialmente vuoto
5. fine prova: arresto del cronometro CR, deviazione del flusso mediante DF e lettura del livello raggiunto L
6. si calcola la portata media dal rapporto fra la quantità di liquido accumulata e la durata della prova (nota)
7. si confronta il valore calcolato con quello indicato dallo strumento.

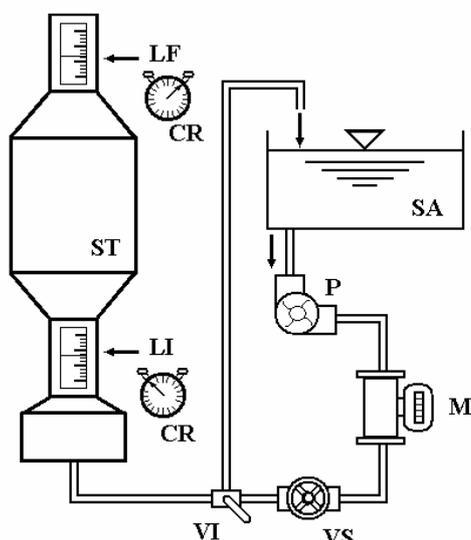


Figura 3.4 – Impianto primario (dinamico) con inizio e fine prova con flusso a regime

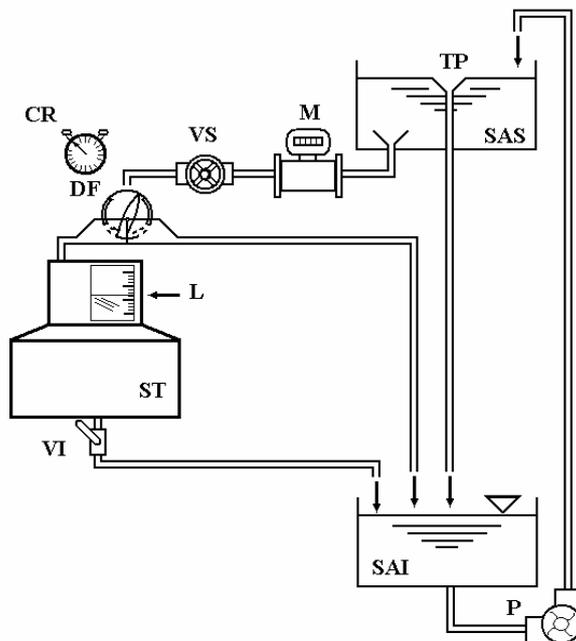
Procedura schematica di funzionamento:

1. regolazione iniziale della portata mediante la pompa P e la valvola di strozzamento VS
2. attesa delle condizioni di stabilità del flusso, il liquido ritorna sempre nel serbatoio di accumulo SA
3. inizio prova: il liquido viene deviato dalla valvola a tre vie VI nel serbatoio di taratura ST
4. il liquido raggiunge il livello iniziale LI: azionamento del cronometro CR
5. il liquido attraversa lo strumento da tarare M e riempie il serbatoio tarato ST, inizialmente vuoto
6. il liquido raggiunge il livello finale LF: fine prova e arresto del cronometro CR e lettura del tempo trascorso
7. si calcola la portata media dal rapporto fra la quantità di liquido accumulata (nota) e la durata della prova
8. si confronta il valore calcolato con quello indicato dallo strumento.

Negli impianti con inizio e fine prova con flusso a regime, invece, il conteggio del tempo inizia solo a valle del raggiungimento delle condizioni di stazionarietà del flusso. Se a questo si aggiunge il fatto che anche la misurazione della massa, o del volume, del fluido transitato viene eseguita in condizioni statiche (condizioni più favorevoli), immediatamente dopo la fine di ciascuna prova, è facile intuire come essi garantiscano le condizioni di taratura ottimali.

Gli impianti primari di tipo statico possono essere ulteriormente adattati per la taratura di misuratori particolarmente sensibili alle fluttuazioni di portata istantanea, realizzando un apposito serbatoio di alimentazione (SAS in figura 3.5) sopraelevato a battente idraulico costante (10÷30 m) e la misurazione gravimetrica della quantità di liquido effluita nel misuratore. In essi l'alimentazione del misuratore in taratura avviene per gravità, riuscendo, in tal modo, senza apparecchiature ausiliarie, ad ottenere un flusso con variazioni trascurabili di portata istantanea.

Uno degli inconvenienti maggiori negli impianti di tipo statico è legato all'utilizzo, soprattutto alle grandi portate, di un deviatore rapido di flusso, costituito [32] da un condotto mobile, o da un disco piano impernato su di un asse orizzontale o verticale, e tale da garantire una deviazione completa del flusso sufficientemente veloce (inferiore a 0,1 s), ripetibile e simmetrica nei due versi, al fine di ridurre la possibilità di un significativo errore nella misura del tempo di riempimento ⁽¹⁾. Il deviatore dovrebbe, inoltre, essere costruito in modo tale che il suo azionamento non perturbi lo stato di regime di moto stazionario richiesto da questa metodologia di prova. Relativamente all'incapacità del deviatore di invertire istantaneamente il flusso nel serbatoio di taratura (ST), è accettato che il conteggio del tempo parta: i) nell'istante $t_{0, sim}$ in cui comincia il moto stesso, se il comportamento del mezzo deviatore è identico (la curva C in figura 3.6 è simmetrica in entrambe le direzioni) sia nel moto di deviazione del flusso verso il serbatoio tarato (ST) sia in quello verso il serbatoio di accumulo (SA); ii) nell'istante $t_{0, ns}$ se la condizione di simmetria non è verificata, corrispondente alla posizione di mezzeria del getto di liquido ed equivalente in figura 3.6 all'istante in cui le aree A (volume di liquido diretto nel serbatoio di accumulo durante la prova) e B (volume di liquido diretto nel serbatoio tarato prima che la prova abbia inizio) sono uguali.



Procedura schematica di funzionamento:

1. il liquido viene pompato dal serbatoio di accumulo inferiore SAI al serbatoio di accumulo superiore SAS
2. viene raggiunto lo sfioro del tubo di troppo pieno TP: il liquido resta a battente costante nel SAS
3. regolazione iniziale della portata mediante la valvola di strozzamento VS, il liquido torna sempre in SAI
4. inizio prova: azionamento del cronometro CR e deviazione del flusso mediante DF
5. il liquido attraversa lo strumento da tarare M e riempie il serbatoio tarato ST, inizialmente vuoto
6. fine prova: arresto del cronometro CR, deviazione del flusso mediante DF e lettura del livello raggiunto L
7. si calcola la portata media dal rapporto fra la quantità di liquido accumulata e la durata della prova (nota)
8. si confronta il valore calcolato con quello indicato dallo strumento.

Figura 3.5 – Impianto primario (statico) con inizio e fine prova con flusso a regime ed alimentazione a gravità sotto battente idraulico costante

⁽¹⁾ Il tempo di riempimento del serbatoio di riferimento (ST) è, generalmente misurato per mezzo di un contatore elettronico con un riferimento interno ai cristalli di quarzo, in grado cioè, se supportato da un display con sufficiente risoluzione (almeno 0,01 s) e da una periodica taratura, di rendere trascurabile l'errore connesso a tale strumento.

In entrambi i casi, è possibile calcolare l'errore imputabile ad imperfezioni del flusso attraverso una semplice procedura [32] che prevede:

- ✓ la misura della portata all'inizio \dot{V}_1 ed alla fine \dot{V}_2 della prova;
- ✓ l'esecuzione di n (almeno 25) rapide deviazioni del flusso nel serbatoio di taratura, misurando ogni volta la massa di liquido deviato m_i e il tempo trascorso t_i ;
- ✓ la somma della massa complessiva deviata M_{tot} e del tempo totale trascorso t_{tot} ;
- ✓ il calcolo della portata media \dot{V}_{med} tra le due letture di cui al punto 1;
- ✓ la stima dell'errore, pari a:

$$\frac{\Delta t}{t} = \frac{1}{n-1} \cdot \frac{M_{tot} / t_{tot}}{\dot{V}_{med}} \quad (3.1)$$

Relativamente ai deviatori impiegati negli impianti di tipo statico, i tempi tipicamente occorrenti per la completa deviazione del flusso sono in genere compresi fra 0,05 s e 0,5 s; conseguentemente l'incertezza di misura del tempo può essere ridotta alla sola componente aleatoria, cioè tipicamente a pochi centesimi di secondo. Su un tempo di prova non inferiore a mezzo minuto si può, quindi, raggiungere un'incertezza relativa dell'ordine di $\pm 0,01\%$, che sarà in genere poco maggiore negli impianti di tipo dinamico.

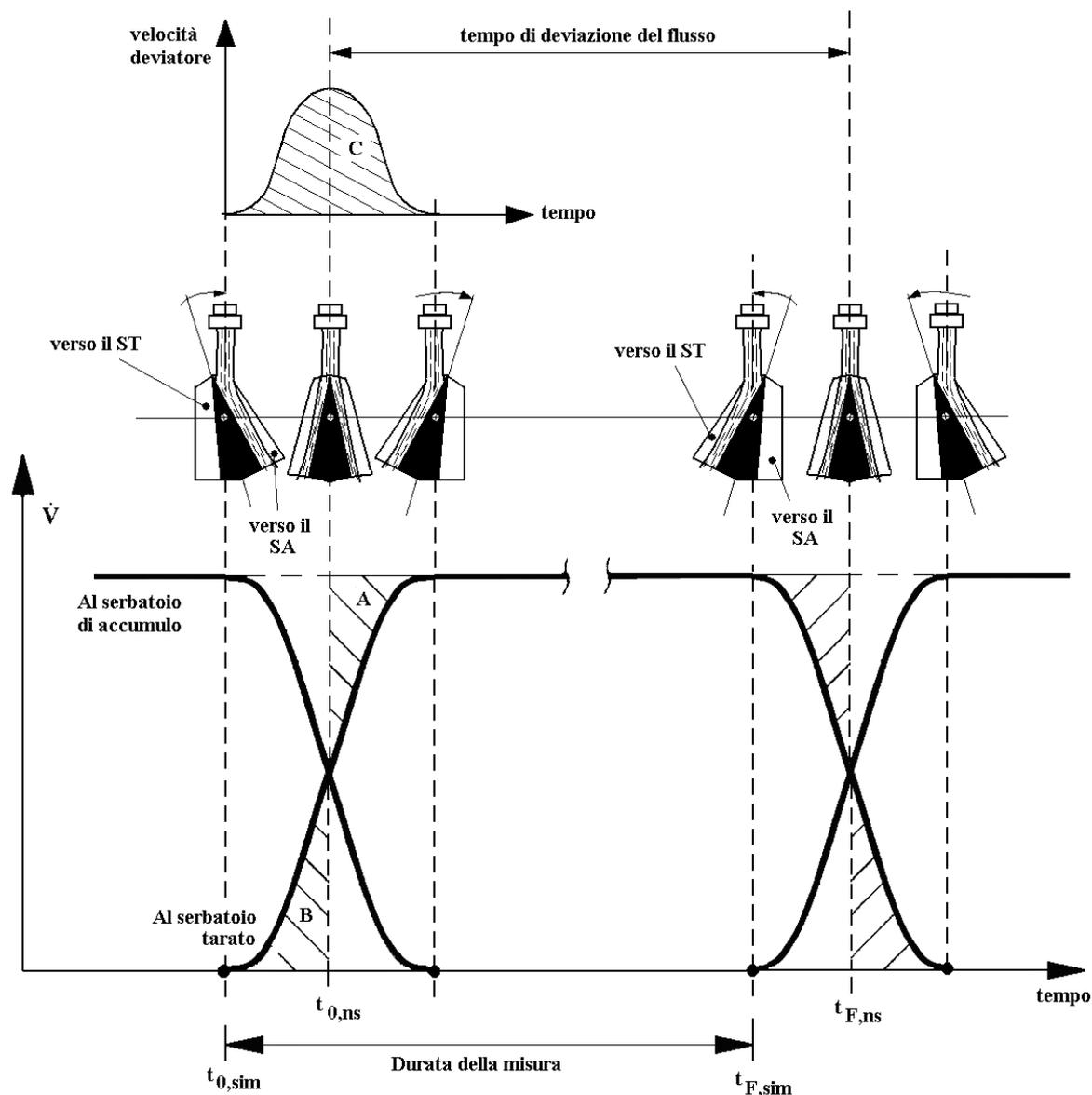
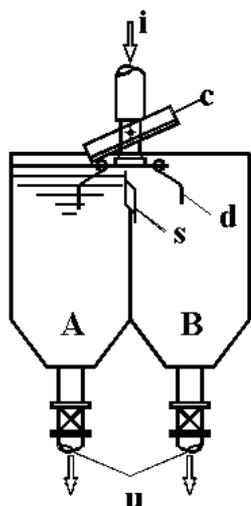


Figura 3.6 – Variazione della portata istantanea nel deviatore di flusso

Un sistema che permette di ridurre le incertezze legate al tempo di deviazione del flusso e misurare portate per lunghi periodi di tempo è rappresentato schematicamente in figura 3.7. Esso è costituito da due serbatoi affiancati, ed aventi la stessa capacità, (generalmente) collegati nella parte superiore con uno stramazzo (s) a spigolo vivo, mentre un convogliatore mobile (C) dirige il flusso in un serbatoio o nell'altro: le misurazioni vengono effettuate su un serbatoio mentre l'altro è in fase di riempimento. Nella parte inferiore di ciascun serbatoio sono installate valvole (u) che consentono un rapido scarico del fluido dopo la misura.



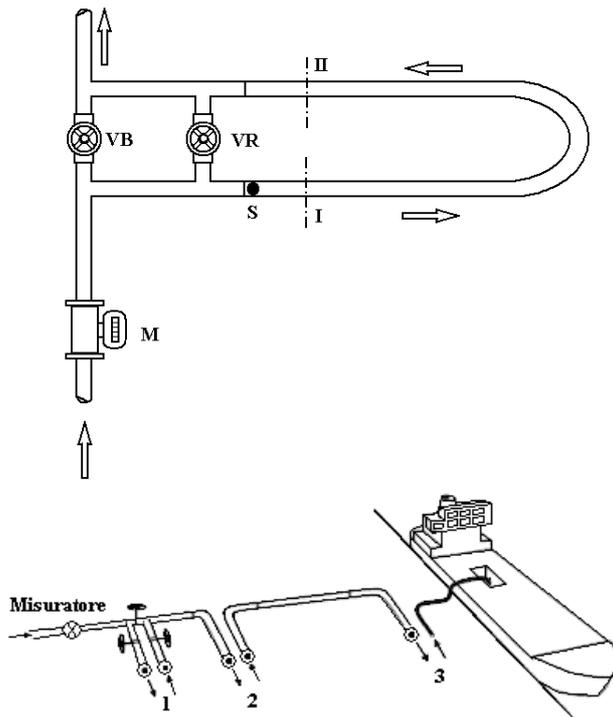
Procedura schematica di funzionamento:

1. Inizio della prova: viene azionato il dispositivo C di commutazione per convogliare il flusso verso uno dei serbatoi vuoti, ad esempio A, la cui valvola di scarico u è chiusa
2. Il liquido trabocca dallo stramazzo s nel secondo serbatoio, il flusso viene deviato verso il secondo serbatoio dal deflettore d che commuta il convogliatore
3. Il serbatoio B è in fase di riempimento: si lascia stabilizzare il livello del liquido in A e quindi lo si svuota rapidamente tramite u
4. Il liquido trabocca dallo stramazzo s nel primo serbatoio, il flusso viene deviato verso il primo serbatoio dal deflettore d che commuta il convogliatore
5. Il volume totale effluito sarà pari al prodotto del volume dei serbatoi per il numero di riempimenti più il volume del liquido nel serbatoio parzialmente riempito a fine prova.

Figura 3.7 – Schema di funzionamento di un doppio serbatoio volumetrico

Il problema della deviazione istantanea del flusso non sussiste, invece, negli impianti di tipo dinamico. In essi, infatti, una volta raggiunte le condizioni di stazionarietà, il flusso può essere deviato anche lentamente entro il serbatoio di misura, poiché il conteggio del tempo inizia solo al raggiungimento di un livello iniziale (LI in figura 3.4) tale da garantire l'ormai completo smorzamento di ogni perturbazione indotta dalla deviazione stessa. L'inconveniente è legato, stavolta, alla misura dinamica (affetta da maggiore incertezza) della massa o del volume del fluido accumulato.

Le tecniche su descritte sono generalmente adatte ad essere applicate solo in laboratori con competenze tali da poter non solo realizzare gli stessi impianti ma mantenerne nel tempo le caratteristiche metrologiche. Molto spesso è, però, fisicamente ed economicamente impossibile smontare dall'impianto il misuratore destinato alle operazioni di verifica per destinarlo ai laboratori suddetti. In tal caso è possibile ricorrere a due approcci differenti. Il primo richiede l'utilizzo di un secondo misuratore (di riferimento) disposto in serie al misuratore utilizzato in esercizio, per controllarne con continuità le prestazioni metrologiche. Come misuratore di riferimento può essere utilizzato, in funzione del grado di accuratezza desiderato, o un misuratore volumetrico o un misuratore ad ultrasuoni di tipo clamp-on, che a fronte di una minore accuratezza garantisce una maggiore semplicità d'uso e di montaggio senza richiedere interruzioni di esercizio. Il secondo approccio è adatto per misuratori che per l'importanza economica che rivestono (ad esempio i misuratori utilizzati per la contabilizzazione fiscale di prodotti petrolchimici), necessitano di frequenti verifiche in campo; esso consiste nell'utilizzo di un impianto di prova campione trasportabile, cosiddetto "pipe prover" (figura 3.9), ed appartenente alla tipologia volumetrica dinamica con inizio e fine prova con flusso a regime.



Procedura schematica di funzionamento:

1. Inizio della prova: viene azionata la valvola di bypass **VB** di commutazione per convogliare il flusso verso la sezione di misura ad U
2. Il liquido spinge lungo tutto il percorso una sfera di elastomero **S** che agisce come un pistone a tenuta
3. Durante la corsa la sfera aziona per contatto al passaggio due microinterruttori **I** e **II** per il conteggio del tempo di prova e per l'acquisizione del segnale emesso dallo strumento in prova
4. A fine prova la sfera **S** viene riportata nella posizione iniziale aprendo l'apposita valvola di ripristino **VR**.

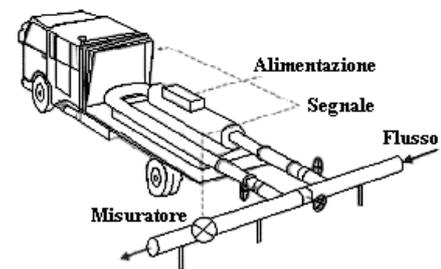
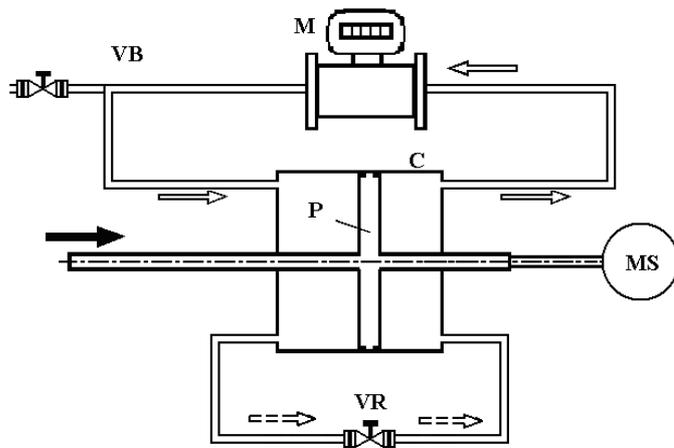


Figura 3.8 – Schema di funzionamento ed esempi di installazione di un impianto volumetrico a tubo (pipe prover)

In essi l'organo di misura è costituito da un lungo tratto di tubazione, il cui volume interno (compreso fra due stazioni di riferimento poste agli estremi), accuratamente misurato, viene "spazzato" durante la prova da una sfera di gomma o plastica riempita di acqua e gonfiata fino a che il suo diametro sia circa il 2% maggiore di quello del condotto di misura. Eventuali trafilamenti del fluido nello spazio compreso tra la sfera e le pareti del tubo, sono contenute dal meato capillare occupato dallo stesso fluido di misura, che garantisce, pertanto, la tenuta idraulica. Il volume interno deve essere piuttosto grande per rendere trascurabili le incertezze di misura dovute alla deformabilità della sfera ed al relativamente grossolano sistema di azionamento degli interruttori. Proprio per le loro dimensioni notevoli queste tipologie di impianti possono essere utilizzate solo in installazioni con spazio sufficiente a contenerle, diventando, invece, improponibili in corrispondenza di impianti quali quelli su piattaforme marine per l'estrazione del greggio.

Per ovviare a queste limitazioni, da pochi anni sono stati sviluppati impianti concettualmente analoghi, ma realizzati in dimensioni assai minori sotto forma di gruppi pistone-cilindro (muniti di guarnizione a perfetta tenuta e di dispositivi per la rilevazione di eventuali fughe), nei quali l'area trasversale e la corsa dei quali possono essere misurate con incertezze estremamente contenute. Si realizzano così impianti campione automatizzati e di dimensioni contenute, in grado di elaborare anche grandi portate, con differenti ed interessanti principi costruttivi. In sostanza, data la ottima regolarità geometrica, comunque necessaria perché l'accoppiamento pistone cilindro funzioni, la taratura può essere effettuata semplicemente in base ad un congruo numero di misurazioni del diametro e dello spostamento. E' in generale buona norma (obbligatoria per ottenere l'omologazione da parte degli Uffici Metrici) verificare tale taratura mediante confronto con serbatoi campione, anche poco accurati, al fine

di evidenziare l'eventuale presenza di fughe e difetti funzionali del dispositivo, nonché la completa eliminazione di bolle d'aria quando si lavora con liquidi.



Procedura schematica di funzionamento:

1. Inizio della prova: viene riempito il cilindro C mediante la valvola di commutazione VB
2. Viene azionato il motore MS che tramite una vite a circolazione di sfere mette in movimento il pistone P
3. La portata nota così generata attraversa il misuratore M e si trasferisce dall'una all'altra camera del cilindro. La pressione del sistema non cambia perché il volume interno resta costante
4. Per la corsa di ritorno si aziona la valvola di ritorno VR.

Figura 3.9 – Schema di funzionamento di un impianto campione a pistone cilindro

Con il volume dei cilindri campione generalmente limitato da ragioni tecniche ed economiche, riducendo i tempi di prova a valori anche inferiori ad un secondo, è possibile ottenere portate di prova superiori ai 1000 L/s, ma diventa problematico assicurare il raggiungimento di condizioni di moto a regime nel misuratore durante la rapida corsa utile di taratura.

Gli impianti dinamici e volumetrici basati su organi di misura del tipo a pistone-cilindro, inizialmente nati per essere utilizzati nell'industria petrolifera, hanno oggi trovato un nuovo sviluppo anche in altri settori grazie alla realizzazione di impianti di taratura completi sotto forma di banchi compatti e gestiti da calcolatore. L'organo di misura è un pistone-cilindro a doppio stelo ed a doppio effetto azionato da un motore a velocità variabile, in grado di operare a pressioni anche fino a 10 MPa, con un minimo impegno di potenza, e di conseguenza con minime dispersioni termiche; questo è fondamentale soprattutto nel caso di tarature in gas.

I dispositivi a "pistone tuffante" sono basati praticamente sullo stesso principio dei dispositivi pistone-cilindro. Trattasi di pistoni solitamente piuttosto lunghi in relazione al diametro e rettificati sulla superficie laterale esterna i quali, sotto l'azione di un motore, del peso proprio o della pressione stessa del fluido con cui sono a contatto, attraversano una guarnizione fissa e si immergono in una camera contenente il fluido di lavoro compiendo una corsa tale da spostare un volume di fluido noto in un tempo noto [73]. Tali dispositivi presentano ovviamente le stesse caratteristiche (ridotte dimensioni, maggiori accuratezze e minori rischi dovuti all'assenza di evaporazione del liquido da misurare, grazie alla mancanza di contatto con l'atmosfera) tipiche dei sistemi pistone-cilindro, con gli ulteriori vantaggi: i) di non avere le pareti della camera di misura a contatto con il pistone (ciò rende non necessaria una loro lavorazione accurata, ma è sufficiente assicurare l'assenza di sensibili deformazioni elastiche); ii) a parità di dimensioni, i pistoni tuffanti sono assai più facili da costruire, economici ed accurati (la finitura superficiale e l'accurata misurazione del diametro della superficie interna è decisamente più difficile per un cilindro cavo rispetto a quella di una superficie cilindrica esterna); iii) la guarnizione è situata in posizione esterna ed accessibile, permettendo quindi una più facile ispezione e regolazione al fine di controllare ed annullare eventuali fughe. Gli svantaggi tipici dei pistoni tuffanti sono caratterizzati, invece, da: i) la presenza di spazi morti fra pistone e pareti della camera di contenimento del fluido (ciò comporta una maggiore incertezza di misura soprattutto nel caso in cui non si riesca a garantire valori di pressione e/o temperatura costanti); ii) la pratica impossibilità di lavorare in

circuito chiuso a pressione costante. Le ridotte incertezze con cui possono essere determinati gli spostamenti del pistone ($< 0,01\%$), l'area della sezione retta interna dei cilindri ($\sim 0,01\%$ per i sistemi pistone-cilindro) nonché il diametro esterno della sezione retta dei cilindri ($\sim 0,001\%$, per i sistemi pistone-tuffante), consentono il raggiungimento di incertezze tipiche del volume dei campioni, determinato per via puramente geometrica, di circa $\pm 0,03\%$ (per i sistemi pistone-cilindro) e di circa $\pm 0,003\%$ (per i sistemi pistone-tuffante). Laddove sia richiesta una accuratezza particolarmente spinta, l'attenzione maggiore dovrà essere focalizzata sul controllo dei fenomeni secondari, quali i gradienti di temperatura e pressione (che provocano variazioni di volume del fluido nel tempo o nelle varie parti del sistema); oppure l'adesione di sottilissimi strati di liquido al pistone od al cilindro, l'imperfetto riempimento, la separazione di bolle o le micro-fughe [73].

3.2 I campioni di volume

Un discorso a parte merita la verifica metrico legale dei misuratori di liquidi diversi dall'acqua. L'industria della distribuzione dei prodotti petroliferi, nonché l'attività di accertamento fiscale dei volumi di idrocarburi movimentati, richiede normalmente l'utilizzo di idonei misuratori volumetrici di tipo approvato mediante decreto o con certificato rilasciato dagli organismi nazionali competenti per la metrologia legale. In particolare, la normativa nazionale vigente prevede che tutti i misuratori di carburante (e quindi non tutti i misuratori di liquidi diversi dall'acqua) usati nelle transazioni commerciali siano soggetti a due tipi di verificazioni: la verifica prima (in fabbrica e/o sul campo) da effettuarsi prima dell'immissione sul mercato e la verifica periodica da effettuarsi successivamente sul campo per accertare il mantenimento nel tempo delle caratteristiche metrologiche.

La verifica prima risulta essere un atto obbligatorio per gli strumenti nuovi da effettuarsi, prima della loro vendita o messa in uso in commercio. Le operazioni ad essa connesse si considerano completate e formalizzate con l'apposizione dei bolli metrici (un primo bollo a stemma riportante il numero dell'ufficio verificatore ed un secondo contenente il numero identificativo del verificatore che ha eseguito l'operazione).

Relativamente alla verifica periodica, la normativa comunitaria lascia agli Stati membri la facoltà di provvedere ai controlli finalizzati ad accertare il mantenimento nel tempo delle caratteristiche metrologiche e, inoltre, di fissare criteri e periodicità degli interventi per l'esecuzione di tali verifiche. In alcuni Stati europei, tali accertamenti vengono effettuati con periodicità non prefissata, per altri vengono fissate di anno in anno le categorie di utenti i cui strumenti saranno sottoposti a verifica. In Italia il Decreto 182/00 [6] ha stabilito la periodicità biennale di verifica per i "complessi di misura per carburante" e la periodicità quadriennale per i "misuratori di liquidi diversi da carburanti e dall'acqua". Un ulteriore importante aspetto presente in tale decreto riguarda la possibilità di delegare, con condizioni e modalità prestabilite, la verifica periodica a laboratori accreditati dalle Camere di Commercio ed operanti in conformità alla normativa UNI CEI EN 17025 [33]. Questa delega costituisce sicuramente un'importante novità nel campo della metrologia legale in Italia, in quanto i controlli sugli strumenti in servizio sono sempre stati di esclusiva competenza degli Uffici metrici (le cui funzioni e poteri sono stati recentemente trasferiti alle Camere di Commercio).

L'accertamento dei requisiti di tolleranza dei suddetti sistemi di misura viene, di norma, effettuato dalle Autorità Locali di Metrologia Legale mediante l'utilizzo di idonei impianti di prova comprendenti, tra l'altro, idonee misure di capacità i cui requisiti sono definiti da appositi provvedimenti legislativi [8, 28] analizzati in dettaglio nel paragrafo seguente. I campioni materiali di capacità, in particolare, devono essere sempre forniti di apposita

marcatura contenente le seguenti informazioni: i) nome del costruttore; ii) numero seriale; iii) valore nominale del volume di liquido “contenuto”, ad una certa temperatura di riferimento; iv) nome del materiale utilizzato e relativo coefficiente di dilatazione termica β , che ne consente l’uso a temperature diverse dalla temperatura a cui sono stati tarati. Le temperature di riferimento sono tipicamente 15 °C o 20 °C (più raramente 0 °C), ma è consuetudine che questi campioni siano tarati anche a temperatura ambiente. Relativamente alla temperatura di utilizzo é opportuno che essa non si discosti di più di 10 °C dalla temperatura a cui é stata fatta la taratura, al fine di non accrescere il contributo d’incertezza legato alla correzione termica. A riguardo, in tabella 3.1 sono riportati i coefficienti nominali di dilatazione cubica β per materiali di uso comune, nonché il minimo scostamento ΔT dalla temperatura di riferimento in grado di provocare una variazione dello 0,01% del volume nominale.

Tabella 3.1 – Coefficienti nominali di dilatazione cubica per materiali di uso comune e minimo scostamento ΔT corrispondente ad una variazione $\Delta V/V_{NOM}=0,01\%$

Materiale	β [°C⁻¹]	ΔT [°C]
Acciaio al carbonio	$3,6 \cdot 10^{-5}$	2,8
dolce (< 0,15% C)	$3,35 \cdot 10^{-5}$	3,0
Acciaio inox (valori medi)	$4,8 \cdot 10^{-5}$	2,1
tipo 304	$5,18 \cdot 10^{-5}$	1,9
tipo 316	$4,54 \cdot 10^{-5}$	2,2
tipo Seraphin	$4,77 \cdot 10^{-5}$	2,1
Rame	$5,1 \cdot 10^{-5}$	2,0
Ottone o Bronzo	$5,4 \cdot 10^{-5}$	1,9
Vetro borosilicato	$1,0 \cdot 10^{-5}$	10

Una capacità campione dovrebbe essere sempre realizzata di acciaio dolce (a basso contenuto di carbonio), inossidabile o di qualunque altro materiale resistente allo specifico liquido cui è destinato. In particolare, il materiale della capacità destinata a contenere prodotti infiammabili, dovrebbe essere un buon conduttore di elettricità al fine di permettere la dissipazione dei carichi statici. Il coefficiente di espansione termica β non dovrebbe mai eccedere il doppio di quello relativo all’acciaio inossidabile calcolato ad una qualunque temperatura compresa tra -40 °C e + 40 °C.

Per quanto riguarda la geometria (figura 3.10), essa deve:

- ✓ essere preferibilmente di forma cilindrica (ogni sezione orizzontale sia circolare) e circa inscrivibile in una sfera, al fine di avere un alto rapporto volume/superficie bagnata;
- ✓ garantire il completo riempimento e svuotamento, mediante la realizzazione dei tratti superiori ed inferiori a forma tronco conica e con angolo non inferiore a 35° ed a 20° dall’orizzontale, per misure rispettivamente fino a 20 litri e superiori;
- ✓ prevedere adeguati anelli di rinforzo che irrigidiscano la superficie laterale impedendo eventuali distorsioni durante il riempimento e lo svuotamento;
- ✓ prevedere un fondo concavo al fine di prevenire eventuali deformazioni causate dal peso del liquido contenuto.

Dovranno, inoltre, essere previste adeguate maniglie laterali, opportunamente rinforzate per evitare deformazioni durante il trasporto ed una opportuna bolla di livello (se la misura è posta su di un piano, il suo asse verticale deve essere perpendicolare alla superficie dello stesso piano).

Il collo superiore deve avere un diametro contenuto (non superiore ai 10 cm) al fine di consentire una sensibilità alle variazioni di livello adeguate agli EMT da rilevare, ma

dovrebbe essere sufficientemente largo da evitare problemi di intrappolamento di liquidi e/o di bolle di aria o vapore, e da consentire una adeguata pulizia della capacità.

Il bordo superiore del collo sarà opportunamente arrotondato a formare un labbro, o sarà rinforzato con una striscia metallica per impedirne la distorsione. Relativamente alla sezione di misura, essa deve prevedere il tratto di riferimento (indicazione del volume nominale) e due scale opposte, sul tratto di collo in vetro o con oblò in vetro su collo metallico.

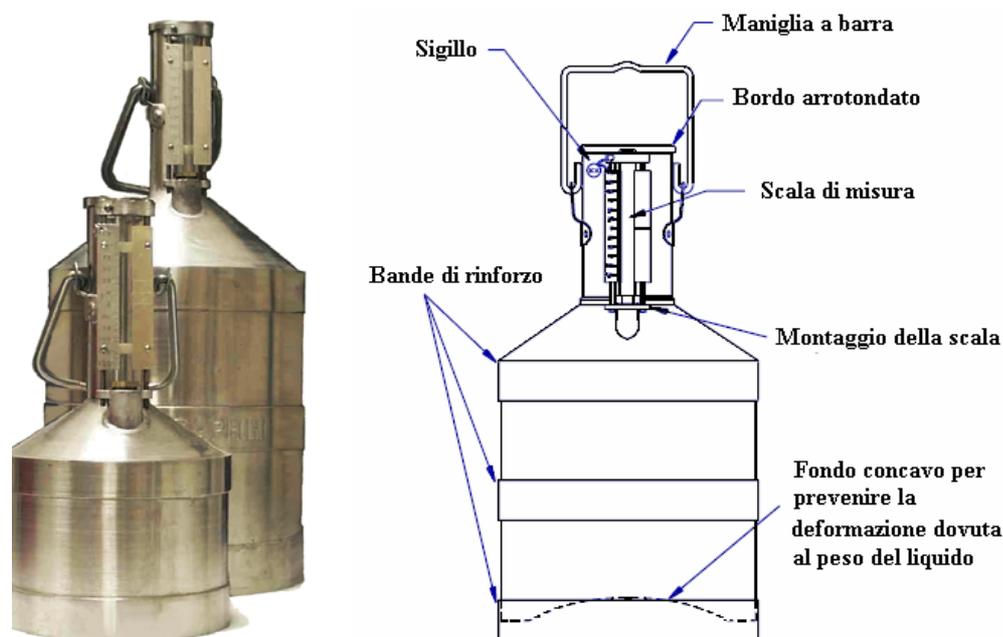


Figura 3.10 – Capacità campioni di classe I

3.3 Problematiche di taratura dei campioni di volume

L'EMT dei misuratori di carburante in verifica, come già detto in §2.2, risulta inferiore allo 0,3 %V.L., per cui la verifica di tali strumenti può essere effettuata solo con campioni aventi un'incertezza di misura non superiore ad 1/3 dell'EMT, cioè inferiori allo 0,1 %V.L. Tali caratteristiche possono essere ottenute solo con impianti "primari", oppure eseguendo la verifica con misure campioni di capacità. La legislazione nazionale [8] rispettivamente alle misure di capacità campioni prevede un EMT non superiore allo 0,04 %V.L. contro l'errore previsto dalla raccomandazione OIML R120 [28] non superiore allo 0,05 %V.L.

Un fattore spesso trascurato a riguardo, ma purtroppo alquanto vincolante, è l'incertezza di misura associata alla taratura della misura del campione. In Italia, a meno di non riferirsi direttamente all'Istituto Metrologico Primario INRIM, è possibile tarare misure campioni da 10 a 2000 L con un'incertezza di 0,03 %V.L. e da 2000 a 25000 L con un'incertezza di 0,035 % V.L. (con un fattore di copertura di $k=2$). Come si evince dalla tabella 3.3 le incertezze attualmente dichiarate dai centri SIT in Italia, diversi dall'IMP, sono di poco inferiori (in alcuni casi anche superiori) all'EMT, il che rende certamente critica la costruzione di una gerarchia di campioni interni a partire da un'unica capacità, per l'inevitabile incremento dell'incertezza connessa alla taratura.

Tabella 3.3 – Tolleranze richieste ed incertezze di taratura per le misure di capacità campioni

Campione di volume		D.P.R. n. 1215/58 [1]		Centro SIT n. 108	INRIM
Nome	Volume [litri]	Tolleranza [ml]	Tolleranza [%]	Incertezza taratura [%] (*)	Incertezza taratura [%] (*)
Decilitro	0,1	1,0	1,0	---	0,02
Doppio decilitro	0,2	1,0	0,5	---	0,02
Quarto di litro	0,25	1,0	0,4	---	0,02
Mezzo litro	0,5	2,5	0,5	---	0,01
Litro	1,0	2,5	0,25	0,12	0,01
Doppio litro	2,0	2,5	0,125	0,12	0,01
Mezzo decalitro	5,0	5,0	0,1	0,12	0,01
Decalitro	10	5,0	0,05	0,06	0,005
Doppio decalitro	20	10	0,05	0,03	0,005
Quarto di ettolitro	25	10	0,04	0,03	0,005
Mezzo ettolitro	50	25	0,05	0,03	0,005
Ettolitro	100	25	0,025	0,03	0,005
Doppio ettolitro	200	50	0,025	0,03	(**)
Mezzo chilolitro	500	100	0,02	0,03	(**)
Chilolitro	1000	100	0,01	0,03	(**)
Doppio chilolitro	2000	250	0,0125	0,03	(**)
≥ Penta chilolitro	≥ 5000	≥ 2000	0,04	0,035	(**)

(*) L'incertezza di taratura è espressa al livello di fiducia del 95% (k=2).

(**) Viene valutata per ogni specifica prova.

In ogni caso, per poter ottenere le incertezze richieste dalla normativa vigente non è sufficiente acquistare campioni di tale classe, ma è necessario: i) verificare periodicamente i campioni mettendo a punto una precisa gerarchia che ne garantisca la riferibilità ai campioni nazionali; ii) utilizzare idonee procedure di taratura e di calcolo dell'errore, definendo nel contempo la classe di incertezza del campione in prova.

Relativamente alla verifica periodica prevista per questi campioni, in tabella 3.2 sono riportate le frequenze minime di verifica periodica di campioni di volume come suggerito da [35]

Tabella 3.2 – Frequenze minime di taratura dei campioni di volume [35]

Tipologia di campione	Min. frequenza
Serbatoi campione > 50 litri (equipaggiati con valvole)	4 anni
Capacità campioni ≤ 50 litri	1 anno
Pipe prover	4 anni
Vetreteria graduata	10 anni

Per quanto riguarda, invece, la definizione di apposite procedure di prova per questi campioni, nel seguito sono riportate le principali metodologie attualmente riconosciute per la validazione metrologica delle stesse capacità.

3.4 Metodologie di taratura dei campioni di volume

La taratura di una misura campione consiste sostanzialmente nel determinare il volume, o la correzione al volume nominale, della cavità interna del serbatoio, nonché nel valutare l'incertezza associata a tale volume. Teoricamente, affinché i dati ricavati dall'operazione di taratura abbiano la massima corrispondenza con l'utilizzo cui lo strumento è effettivamente destinato, la stessa taratura dovrebbe essere eseguita nelle effettive condizioni di esercizio, vale a dire entro il campo dei valori previsti di temperatura, ed utilizzando lo stesso fluido di esercizio. Nella pratica, a causa della variabilità dei carburanti utilizzati e della complessità procedurale nella taratura con fluidi tossici e/o infiammabili, viene sempre utilizzato come fluido di prova l'acqua. I metodi attualmente usati per la taratura dei serbatoi sono il metodo geometrico, il metodo gravimetrico [42, 57] ed il metodo volumetrico (o comparativo) [35, 42]. Il primo metodo viene utilizzato solo per i grandi recipienti di forma regolare (e.g. gasometri) e si basa sulla misura geometrica delle dimensioni interne del recipiente. Il metodo gravimetrico viene generalmente utilizzato in laboratorio per misure di piccole o medie capacità e si basa sulla misura gravimetrica della massa apparente di acqua pura (con densità nota) necessaria a riempire (svuotare) il campione fino a un livello di riferimento impresso sulla stessa capacità; quest'ultimo è certamente il metodo che garantisce migliore "precisione". Il metodo volumetrico, infine, viene utilizzato per cisterne, serbatoi e capacità e si basa sul confronto del volume del recipiente in prova con quello di una capacità campione preventivamente tarata; la misura viene effettuata travasando il volume di un fluido dal campione al serbatoio in prova, o viceversa.

Per quanto riguarda il liquido di prova per la taratura dei recipienti campione di volume, l'acqua pura (bidistillata e degassata) è l'unico liquido preso in considerazione dall'INRIM. Nella pratica operativa si usa più frequentemente l'acqua deionizzata, la cui densità generalmente differisce da quella dell'acqua più pura (ad esempio bidistillata) entro lo 0,001% [42], che per gli scopi della Metrologia Legale può ritenersi del tutto trascurabile (un errore sistematico massimo di 1 parte su 100.000 corrisponde ad un ml su 100 litri).

E' consuetudine classificare le stesse capacità campioni in funzione della tipologia di taratura seguita in:

- ✓ campioni di classe I ad alta risoluzione: trattasi di capacità a collo stretto, in acciaio inossidabile, la cui accuratezza è stata determinata mediante taratura gravimetrica con masse di classe F1;
- ✓ campioni di classe II ad alta risoluzione: trattasi di capacità a collo stretto, in acciaio inossidabile, la cui accuratezza è stata determinata mediante taratura volumetrica per confronto con una capacità di classe I;
- ✓ campioni di classe III (di lavoro): trattasi di capacità a collo standard, la cui accuratezza è stata determinata mediante taratura volumetrica per confronto con capacità di classe I o II.

Nel seguito vengono proposte ed analiticamente discusse specifiche procedure per la gestione della taratura gravimetrica e volumetrica delle misure di capacità, nonché le metodiche di calcolo dell'errore e dell'incertezza associata alle capacità in prova.

3.4.1 Metodo gravimetrico

Il metodo gravimetrico consiste, come detto, nella determinazione della massa del liquido di riempimento; a tale scopo è sufficiente utilizzare acqua a grado di laboratorio (tipo III o IV) con conducibilità non superiore a $1 \cdot 10^{-4}$ S/m e libera da gas disciolti e metalli pesanti. La determinazione della massa avviene in aria e viene corretta tenendo conto sia della spinta archimedeica, sia degli effetti derivanti dalle variazioni dalla temperatura di riferimento. In

figura 3.11a viene riportato il diagramma di flusso relativo alla procedura di taratura gravimetrica.

Le condizioni ambientali sono, generalmente, scelte pari a $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ ⁽²⁾ con una massima variazione oraria di 1 °C/h , con valori dell'umidità pari al $50\% \pm 10\% \text{ UR}$ ⁽³⁾. Le condizioni di riferimento possono, comunque, variare in funzione del liquido di prova: in particolare, per i prodotti petroliferi ed a base di alcool la temperatura viene fissata pari a 15 °C . Altre importanti precauzioni da osservare per una corretta taratura è che: la temperatura del liquido di prova non differisca più di 2 °C dalla temperatura media del locale durante le pesate (il che suggerisce che la stessa sia mantenuta nel locale di prova per un periodo antecedente non inferiore alla 24 h); l'area in cui viene allestita la stazione di misura non deve essere esposta ad irraggiamento diretto.

La misura della massa in aria viene generalmente eseguita mediante il metodo di (doppia) sostituzione semplice [36], allo scopo di minimizzare gli effetti di non linearità e di deriva della bilancia elettronica utilizzata. La misura della massa netta di acqua in aria (corretta della spinta archimedeica) è data dall'equazione:

$$\rho_w V_{T0} [1 + \beta(t_P - t_0)] \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_w}\right) = (m_F - m_E) \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m}\right) \quad (3.2)$$

dove si è indicato con ρ_w la densità dell'acqua, con β e V_{T0} il coefficiente di espansione volumica ed il volume alla temperatura di riferimento t_0 della capacità in prova, con t_P la temperatura di prova, con $(m_F - m_E)$ la differenza tra le pesate della capacità piena e vuota dello stesso serbatoio ed, infine, con ρ_m la densità dei pesi campioni ⁽⁴⁾ con cui viene tarata la bilancia (bilancia elettronica) o delle masse antagoniste del carico (bilancia meccanica).

Relativamente agli aspetti procedurali da seguire per una corretta esecuzione della taratura gravimetrica, è opportuno chiarire subito che, se da un lato viene lasciata libera scelta nella modalità di esecuzione della pesata ("a riempimento", pesando l'acqua nel recipiente da tarare, o "a svuotamento", pesando l'acqua in un recipiente ausiliario), va invece correttamente definito il tempo di sgocciolamento della capacità in prova, parametro essenziale per la definizione dello stato "vuoto" della stessa capacità. In particolare, la prassi metrologica adottata sia in abito SIT che in ambito Metrologico Legale definisce:

- ✓ stato "pieno" lo stato di riempimento corrispondente alla posizione relativa di tangenza tra il piano stabilito dal livello di riferimento (nominale) e la superficie concava che assume l'acqua nel collo del recipiente;

⁽²⁾ Sono ammesse prove anche ad altre temperature, comunque comprese tra 15 °C e 80 °C

⁽³⁾ Anche per l'umidità è possibile un campo di valori di prova compresi tra il $35 \div 65\% \text{ U.R.}$ [6]

⁽⁴⁾ Il valore delle masse campione non deve necessariamente essere identico a quello del misurando; è generalmente buona consuetudine rispettare una tolleranza non superiore al 5% del misurando. Se il recipiente è di grandi dimensioni ed è installato direttamente sulla bilancia, si possono fare delle varianti, ma in linea di massima si utilizzano le masse campione nominalmente equivalenti al carico d'acqua previsto (con la detta tolleranza).

- ✓ stato “vuoto” lo stato di svuotamento corrispondente al tempo di sgocciolamento che garantisca la maggiore ripetibilità (ad es. per capacità fino a 20 litri, normalmente si adottano 30 s di sgocciolamento dalla fine del flusso principale).

In tabella 3.3 sono riportati a titolo di esempio, i tempi di sgocciolamento consigliati da [34].

Tabella 3.3 – Tempi di sgocciolamento per differenti capacità campioni [34]

Capacità nominale dei campioni	Tempo di sgocciolamento
≤ 5 litri	10 s
≤ 20 litri	20 s
≤ 500 litri	1 min
≤ 5000 litri	2 min
≤ 15000 litri	3 min
≤ 30000 litri	4 min
> 30000 litri	5 min

Tenendo conto, quindi, della relazione intercorrente tra i valori di massa reale e convenzionale si ha:

$$(m_F - m_E) = (m_{FC} - m_{EC}) \frac{\left(1 - \frac{\rho_{as}}{\rho_{ms}}\right)}{\left(1 - \frac{\rho_{as}}{\rho_m}\right)} = 0,99985 \cdot \frac{(m_{FC} - m_{EC})}{\left(1 - \frac{\rho_{as}}{\rho_m}\right)} \quad (3.3)$$

dove si è tenuto conto [26] che $\rho_{as} \approx 1,2 \text{ kg/m}^3$ e $\rho_{ms} \approx 8000 \text{ kg/m}^3$.

Pertanto, combinando le equazioni (3.2) e (3.3) si può ottenere il volume V_{T0} come

$$V_{T0} = \frac{0,99985}{(\rho_w - \rho_a)} \cdot \frac{(m_{FC} - m_{EC})}{[1 + \beta(t_p - t_0)]} \cdot \frac{\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m}\right)}{\left(1 - \frac{\rho_{as}}{\rho_m}\right)} \quad (3.4)$$

Nel caso particolare $\rho_a = \rho_{as}$ la precedente si semplifica, ovviamente, nella:

$$V_{T0} = \frac{0,99985}{(\rho_w - \rho_{as})} \cdot \frac{(m_{FC} - m_{EC})}{[1 + \beta(t_p - t_0)]} \quad (3.5)$$

Ai fini dello studio della propagazione dell'incertezza la (3.4) può essere approssimata con la:

$$V_{T0} = 0,99985 \cdot \frac{(m_{FC} - m_{EC})}{(\rho_w - \rho_a)} \left[1 - \frac{\rho_a - \rho_{as}}{\rho_m} - \beta(t_p - t_0) \right] \quad (3.6)$$

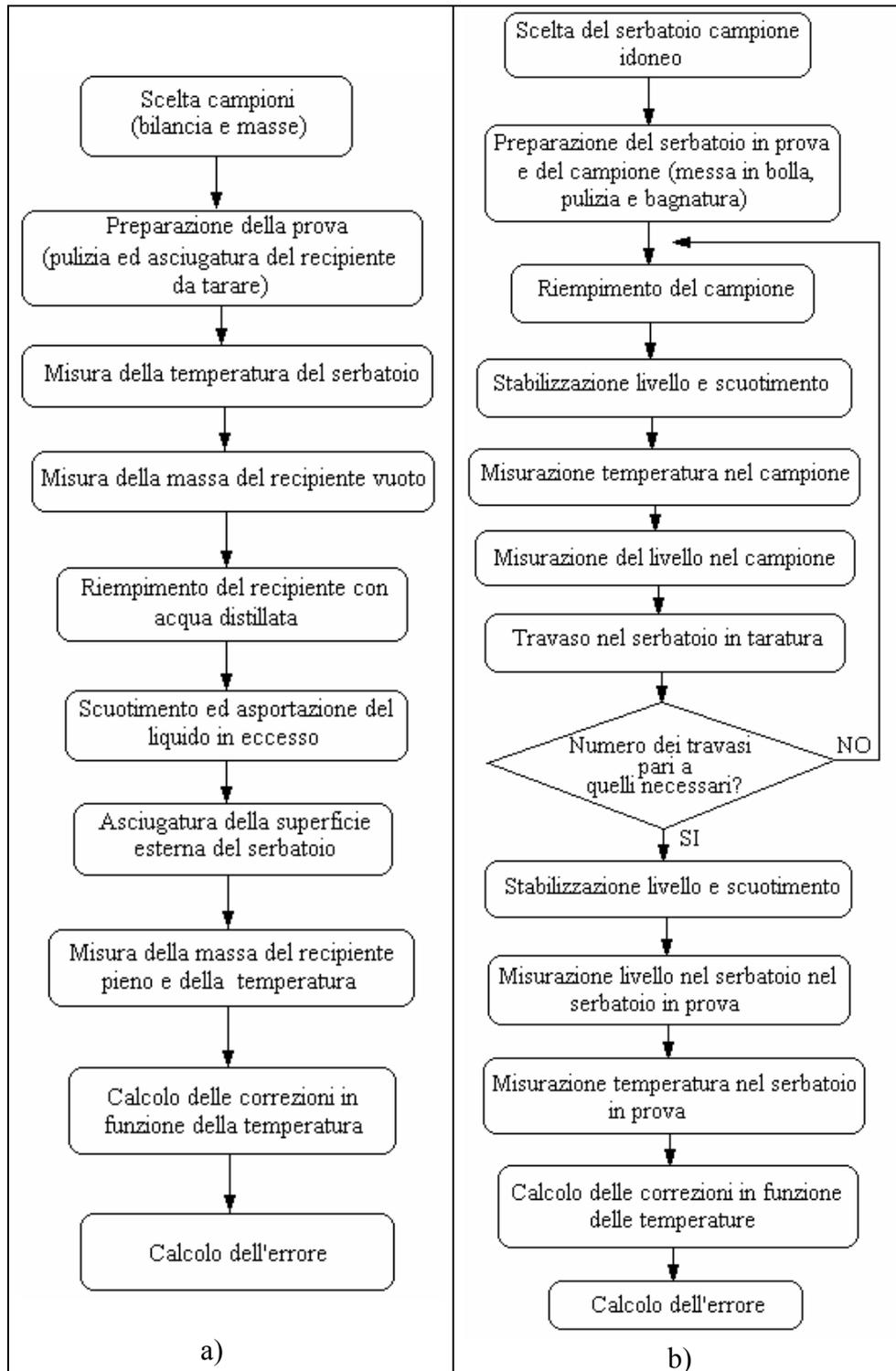


Figura 3.11 – Diagramma di flusso relativo alla procedura di taratura a) gravimetrica, b) volumetrica

La (3.6) è la relazione funzionale utilizzata per la valutazione del volume del serbatoio campione. Essa ha il vantaggio di evidenziare facilmente le principali cause d'incertezza associate alla taratura in oggetto, le quali possono essere riassunte in:

- ✓ incertezza nella misura della massa netta convenzionale $u(\Delta m)$;
- ✓ incertezze sulla massa volumica dell'acqua $u(\rho_w)$, dell'aria $u(\rho_a)$ e della massa $u(\rho_m)$;
- ✓ incertezza sul coefficiente di dilatazione cubica della capacità $u(\beta)$;
- ✓ incertezza sulla misura di temperatura $u(t)$;
- ✓ incertezza dovuta alla procedura di taratura (preparazione, aria disciolta, ecc.) $u(p)$ (questa incertezza si può ritenere trascurabile nel caso di una buona pratica di laboratorio).

Da questo elenco è facile intuire come la dotazione minimale per un laboratorio di verifica delle capacità campioni che garantisca il raggiungimento di livelli di incertezza non troppo elevati non può prescindere da:

- ✓ una buona disponibilità di acqua deionizzata;
- ✓ una bilancia tarata di portata e risoluzione adeguata, in particolare, quest'ultima deve essere almeno pari a 0,1 g per la taratura di tutte le capacità fino a 20 L, ed almeno 1 g per quelle da 50 L ed oltre;
- ✓ una pesiera certificata di portata non inferiore alla massa lorda dei recipienti da tarare riempiti d'acqua;
- ✓ un termometro a liquido certificato (meglio elettrico) con risoluzione non superiore a 0,2 °C;
- ✓ un termometro certificato per la misura della temperatura ambiente;

Applicando la legge di propagazione delle incertezze [31], l'incertezza tipo composta associata alla determinazione del volume in prova V_{TO} risulta:

$$u_C^2 = \sum_i c_i^2 \cdot u^2(x_i) \quad (3.7)$$

I coefficienti di peso c_i , associati alla generica grandezza x_i , sono riportati in colonna 2 della tabella 3.4. Assumendo, in particolare:

$$\left(1 - \frac{\rho_{as}}{\rho_{ms}} \right) \approx 1 \quad (3.8)$$

$$\rho_a \approx \rho_{as}$$

è possibile approssimare gli stessi coefficienti di peso ai valori riportati in colonna 3 della tabella 3.4.

Una tecnica indiretta di misura del volume di una capacità è stata ulteriormente proposta in [47]. Essa consiste sempre di una metodologia gravimetrica, ma valutata attraverso il confronto dei risultati ottenuti con una seconda capacità "riferibile"; consente pertanto l'utilizzo di qualunque liquido di prova, senza che sia necessario conoscerne la densità in funzione della temperatura.

Tabella 3.4 – Coefficienti di sensibilità nella stima dell'incertezza del metodo gravimetrico

x_i	$c_i = \partial V_{TO} / \partial x_i$	c_i (valori approssimati)
Δm	$\frac{0,99985}{(\rho_w - \rho_a)} \left[1 - \frac{\rho_a - \rho_{as}}{\rho_m} - \beta(t_p - t_0) \right]$	$\approx \frac{1}{(\rho_w - \rho_{as})}$
ρ_w	$-0,99985 \cdot \frac{(m_{FC} - m_{EC})}{(\rho_w - \rho_a)^2} \left[1 - \frac{\rho_a - \rho_{as}}{\rho_m} - \beta(t_p - t_0) \right]$	$\approx -\frac{(m_{FC} - m_{EC})}{(\rho_w - \rho_{as})^2}$
ρ_a	$0,99985 \cdot \frac{(m_{FC} - m_{EC})}{(\rho_w - \rho_a)^2} \left[1 - \frac{\rho_a - \rho_{as}}{\rho_m} - \beta(t_p - t_0) \right]$	$\approx \frac{(m_{FC} - m_{EC})}{(\rho_w - \rho_{as})^2}$
β	$-0,99985 \cdot \frac{(m_{FC} - m_{EC})}{(\rho_w - \rho_a)} (t_p - t_0)$	$\approx -\frac{(m_{FC} - m_{EC})}{(\rho_w - \rho_{as})} (t_p - t_0)$
t_p	$-0,99985 \cdot \beta \cdot \frac{(m_{FC} - m_{EC})}{(\rho_w - \rho_a)}$	$\approx -\beta \cdot \frac{(m_{FC} - m_{EC})}{(\rho_w - \rho_{as})}$
ρ_m	$0,99985 \cdot \frac{(m_{FC} - m_{EC})}{(\rho_w - \rho_a)} \cdot \frac{\rho_a - \rho_{as}}{\rho_m^2}$	$\cong 0$

Esempio di taratura gravimetrica

Si supponga di dover verificare una capacità nominale di 5 litri (graduazione della scala 0,005 litri) in acciaio inossidabile ($\beta=5,18E^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) mediante la tecnica gravimetrica. Si utilizza a riguardo: una bilancia analitica avente portata pari a 100 kg e unità di formato pari a 0,01 g; due masse di classe F1 di valore nominale 4 e 10 kg e densità $\rho_m = 8000 \text{ kg/m}^3$; un termometro a bulbo di mercurio con risoluzione pari a 0,1 $^\circ\text{C}$. I dati relativi alla taratura degli strumenti utilizzati sono ricavati dai rispettivi certificati di prova e risultano:

- scarto tipo della bilancia = 0,0075 g;
- incertezza di taratura del termometro = 0,2 $^\circ\text{C}$;
- valore certificato delle masse campioni rispettivamente 4000,02 g e 10000,04 g.

Vengono effettuate 6 letture ripetute, rispettivamente e nell'ordine di:

- a) lo zero della bilancia;
- b) il recipiente vuoto;
- c) lo zero della bilancia;
- d) la massa campione corrispondente al recipiente vuoto;
- e) lo zero della bilancia;
- f) il recipiente pieno;
- g) lo zero della bilancia;
- h) la massa campione corrispondente al recipiente pieno;
- i) la temperatura dell'acqua nel recipiente.

I risultati ottenuti sono riassunti in tabella 3.5, trascurando, come è consuetudine, la prima lettura che spesso risente di effetti indesiderati (inizializzazione di tutto il sistema).

Tabella 3.5 – Risultati della taratura gravimetrica

N.	a)	b)	c)	d)	e)	f)	g)	h)	i)
1	0	4091,50	0	4000,07	0	9081,56	0	10000,21	20,7
2	0	4090,28	0	4000,10	0	9081,67	0	10000,11	20,2
3	0	4091,28	0	4000,10	0	9082,47	0	10000,15	19,7
4	0,01	4091,32	0	4000,06	0	9082,18	0	10000,15	20,0
5	0,01	4090,99	0	4000,06	0	9082,22	0	10000,18	19,9

Dal valore nominale della massa campione utilizzata, dalla sua lettura diretta e dall'eventuale deriva di zero riscontrata è possibile stimare il coefficiente correttivo per la determinazione della tara (massa del recipiente vuoto) e del lordo (massa del recipiente pieno) mediante la:

$$\text{Coeff. corr.} = \frac{\text{valore massa nominale}}{(\text{lettura massa} - \text{deriva zero})}$$

I valori di massa convenzionale dell'acqua contenuta nel recipiente in prova risulta pertanto:

Tabella 3.6 – Calcolo della massa convenzionale netta di acqua

N.	c.c.	m _{EC}	c.c.	m _{FC}	m _{FC} - m _{EC}
1	0,999988	4091,45	0,999983	9081,41	4989,96
2	0,999980	4090,2	0,999993	9081,61	4991,41
3	0,999980	4091,2	0,999989	9082,37	4991,17
4	0,999990	4091,27	0,999989	9082,08	4990,81
5	0,999990	4090,94	0,999986	9082,09	4991,15
Valore medio [g]					4990,90
Scarto tipo [g]					0,569

La temperatura media dell'acqua nella capacità in prova è risultata pari a $t_p = 20,08$ °C, da cui la densità dell'acqua, calcolata secondo la [68], risulta pari a $\rho_w = 998,1869$ kg/m³.

Applicando la relazione semplificata (3.5) con $\rho_a = \rho_{as} = 1,2$ kg/m³ si ha:

Volume misurato $V_{T0} = 5,0039$ L
 L'errore assoluto risulta pari a: $E = V_N - V_{T0} = -3,9$ mL
 L'errore relativo risulta pari a: $e = E/V_N = -0,78$ ‰

Per una esecuzione accurata della prova, immediatamente prima ed a valle delle suddette misure dovranno essere rilevate la temperatura dell'aria, la pressione e l'umidità relativa del locale di misura ai fini della determinazione della densità della stessa aria [43] da utilizzarsi nella valutazione della spinta archimedeica.

Nel caso di esecuzione accurata della prova i parametri metrologici ambientali medi risultano:

$t_a = 19,2$ °C
 $p_a = 99385$ Pa \Rightarrow $\rho_a = 1,180$ kg/m³
 $UR_a = 51\%$

Applicando la relazione estesa (3.4) si ha:

Volume misurato $V_{T0} = 5,0038$ L
 L'errore assoluto risulta pari a: $E = V_N - V_{T0} = -3,8$ mL
 L'errore relativo risulta pari a: $e = E/V_N = -0,77$ ‰

Calcolo dell'incertezza

Poiché la bilancia viene usata come comparatore, l'incertezza associata al Δm è la propagazione dei contributi:

- taratura (normale) $7,50 \cdot 10^{-6}$ kg
 - risoluzione (rettangolare) $2,89 \cdot 10^{-6}$ kg
 - scarto tipo delle 5 letture (normale) $5,69 \cdot 10^{-4}$ kg
- $\Rightarrow u(\Delta m) = 5,691 \cdot 10^{-4}$ kg

L'incertezza associata alla misura di t_p è la propagazione dei contributi:

- taratura (normale) $0,2$ °C
 - risoluzione (rettangolare) $0,1$ °C
 - disuniformità temperatura nel recipiente (normale) $0,02$ °C
 - differenze temperatura liquido-recipiente (normale) $0,2$ °C
- $\Rightarrow u(t_p) = 0,29$ °C

L'incertezza associata alla ρ_w è la propagazione dei contributi:

- incertezza della relazione [68] $0,84$ ppm = $8,38 \cdot 10^{-4}$ kg/m³
 - incertezza della misura di t_p $0,29$ °C
- $\Rightarrow u(\rho_w) = 6,477 \cdot 10^{-2}$ kg/m³

L'incertezza stimata della relazione $\rho_a = \rho_{as}$ (rettangolare) è $10\% = 0,12$ kg/m³ $\Rightarrow u(\rho_{as}) = 6,928 \cdot 10^{-2}$ kg/m³

L'incertezza stimata del valore di β (rettangolare) è $10\% = 5,18 \cdot 10^{-6}$ kg/m³ $\Rightarrow u(\beta) = 2,991 \cdot 10^{-6}$ °C⁻¹

L'incertezza associata al valore di ρ_m (rettangolare) 10 % = 0,12 kg/m³ $\Rightarrow u(\rho_m) = 6,928 \cdot 10^{-2}$ kg/m³

I valori su calcolati, i rispettivi coefficienti di peso (estesi e semplificati), nonché la stima del valore dell'incertezza finale associata al volume certificato sono riportati in tabella 3.7.

Tabella 3.7 – Incertezza associata al volume misurato

x_i	c_i	c_i semplificato	$u(x_i)$
Δm	1,003E-03	1,003E-03	$5,691 \cdot 10^{-4}$
ρ_w	-5,019E-06	-5,021E-06	$6,477 \cdot 10^{-2}$
ρ_a	5,019E-06	5,021E-06	$6,928 \cdot 10^{-2}$
β	-2,545E-02	-2,545E-02	$2,991 \cdot 10^{-6}$
t_p	-2,593E-07	-2,593E-07	0,29
ρ_m	-1,564E-12	0,000E+00	$6,928 \cdot 10^{-2}$
$u(V_{T0})$ in m ³			$7,506 \cdot 10^{-7}$

Il volume certificato della capacità in prova risulta, dunque:

$$V_{T0} = 5003,9 \pm 1,5 \text{ mL}$$

3.4.2 Metodo volumetrico o comparativo

Il metodo comparativo consiste, essenzialmente, nel trasferimento di un volume noto del liquido di prova (tipicamente acqua deionizzata) da una misura campione “riferibile” alla capacità in prova (o viceversa). In figura 3.11b viene riportato il diagramma di flusso relativo alla procedura di taratura comparativa.

Tipicamente, è possibile distinguere una taratura a trasferimento di volumi effettuata in laboratorio (condizioni ambiente controllate) in seguito denominata “fine” ed una in campo denominata “ordinaria” [34], dove l'applicazione dell'una o dell'altra è funzione ovviamente della precisione obiettivo della taratura.

Il metodo comparativo fine presuppone lo svolgimento delle attività di taratura in ambienti chiusi (preferibilmente climatizzati), nonché l'utilizzo di tabelle o relazioni per la determinazione, in funzione della temperatura, della densità dell'acqua [30, 47, 78] o di altri fluidi [17]. La taratura volumetrica ordinaria viene per lo più utilizzata per i campioni di prova per grandi impianti e prevede l'utilizzo di valori medi, sia del coefficiente di dilatazione dei materiali utilizzati, che della densità del liquido di prova.

Metodo volumetrico comparativo fine

Ai fini della valutazione dell'incertezza di taratura connessa al metodo comparativo, si prenderà in esame il caso più generale di una taratura per trasferimento di volumi fine.

L'ipotesi fondamentale è che la massa di liquido trasferita alla misura da tarare m_T sia uguale alla somma delle masse di liquido contenute nel campione di riferimento m_C a meno di altre trascurabili sostanze disciolte m_i :

$$m_T + m_i = \sum m_{C_i} + m_i \quad (3.9)$$

Da questa relazione consegue che la presenza di altre sostanze si elide nel metodo comparativo ed è possibile, quindi, fare riferimento direttamente alle proprietà dell'acqua pura.

La necessità di effettuare una misura di volume implica la necessità di tener conto dell'eventuale differenza tra la temperatura di prova t_P e quella t_0 alla quale il serbatoio campione è stato tarato. Questa differenza, infatti, produce sia una variazione dei volumi del

serbatoio in prova V_{T0} e di quello campione V_{C0} , sia una variazione della massa volumica ρ_w dell'acqua espressa dalla relazione:

$$m_T = \rho_{w_T(t_P)} V_{T0} [1 + \beta_T (t_P - t_0)] = \sum m_{Ci} = \sum \rho_{w_i(t_i)} V_{C0} [1 + \beta_C (t_i - t_0)] \quad (3.10)$$

Considerando nel caso in esame trascurabili, casuali ed a valor medio nullo le variazioni di temperatura e quindi di densità dell'acqua di riempimento del campione ($\sum \Delta \rho_{w_i} = 0$), effettuando lo sviluppo in serie di Taylor dell'espressione al secondo membro e trascurando gli infinitesimi di ordine superiore al primo, si può assumere che:

$$\rho_{w_T(t_P)} V_{T0} [1 + \beta_T (t_P - t_0)] = V_{C0} \bar{\rho}_{w_C} \sum [1 + \beta_C (t_i - t_0)] \quad (3.11)$$

Riscrivendo il secondo membro della (3.11) come:

$$V_{C0} \bar{\rho}_{w_C} \sum [1 + \beta_C (t_i - t_0)] = NV_{C0} \bar{\rho}_{w_C} \frac{[N + \sum \beta_C (t_i - t_0)]}{N} = NV_{C0} \bar{\rho}_{w_C} [1 + \beta_C (\bar{t}_C - t_0)]$$

dove si è indicato con $\bar{t}_C = \frac{\sum t_i}{N}$, la (3.11) diventa:

$$\rho_{w_T(t_P)} V_{T0} [1 + \beta_T (t_P - t_0)] = NV_{C0} \bar{\rho}_{w_C} [1 + \beta_C (\bar{t}_C - t_0)] \quad (3.12)$$

da cui:

$$V_{T0} = NV_{C0} \frac{\bar{\rho}_{w_C} [1 + \beta_C (\bar{t}_C - t_0)]}{\rho_{w_T(t_P)} [1 + \beta_T (t_P - t_0)]} \quad (3.13)$$

L'errore della misura del serbatoio in prova è quindi:

$$E = V_{TL} - V_{T0} = V_{TL} - NV_{C0} \frac{\bar{\rho}_{w_C} [1 + \beta_C (\bar{t}_C - t_0)]}{\rho_{w_T(t_P)} [1 + \beta_T (t_P - t_0)]} \quad (3.14)$$

dove con V_{TL} si è indicato il volume letto nella scala graduata del serbatoio in prova.

Ai fini della valutazione dell'incertezza associata alla determinazione dell'errore E , sviluppando in serie di Taylor e trascurando i termini di ordine superiore al primo (nell'ipotesi che $\beta_T (t_P - t_0) \ll 1$ e $\beta_C (\bar{t}_C - t_0) \ll 1$), la (3.14) può essere approssimata a:

$$E \approx V_{TL} - NV_{C0} \frac{\bar{\rho}_{w_C}}{\rho_{w_T(t_P)}} [1 + \beta_C (\bar{t}_C - t_0) - \beta_T (t_P - t_0)] \quad (3.15)$$

Per eliminare le correlazioni tra le diverse temperature misurate, nonché tra i coefficienti di dilatazione termica, è possibile utilizzare le variabili $\delta t = t_P - \bar{t}_C = (t_P - t_0) - (\bar{t}_C - t_0)$ e $\delta \beta = \beta_T - \beta_C$; da cui sostituendo nella (3.15) è facile ricavare:

$$E \approx V_{TL} - NV_{C0} \frac{\bar{\rho}_{w_c}}{\rho_{w_T}(t_P)} [1 - \beta_C \cdot \delta t - \delta\beta \cdot (t_P - t_0)] \quad (3.16)$$

La (3.16) è la relazione funzionale utilizzata per la valutazione dell'errore nel caso di una taratura per comparazione fine. Essa ha il vantaggio di evidenziare facilmente le principali cause d'incertezza associate alla taratura in oggetto, le quali possono essere riassunte in:

- ✓ incertezza nella lettura $u(V_{TL})$ che ovviamente dipende dalla gradazione della scala
- ✓ incertezza del campione $u(V_{C0})$
- ✓ incertezza sulla massa volumica dell'acqua $u(\rho_{w_T})$ e $u(\bar{\rho}_{w_c})$;
- ✓ incertezza sui coefficienti di dilatazione cubica dei serbatoi $u(\delta\beta)$ e $u(\beta_C)$
- ✓ incertezza sulle misure di differenza di temperatura $u(\delta t)$ e $u(t_T)$
- ✓ incertezza dovuta alla procedura di taratura $u(p)$ (questa incertezza si può ritenere trascurabile nel caso di una buona pratica di laboratorio).

Applicando la legge di propagazione delle incertezze [31], i coefficienti di peso c_i , associati alla generica grandezza x_i nella (3.7), nonché i loro valori approssimati, vengono riportati nella seconda colonna della tabella 3.8.

Tabella 3.8 - Coefficienti di sensibilità nella stima dell'incertezza del metodo volumetrico

Xi	$c_i = \partial E / \partial x_i$ (metodo comparativo fine)	$c_i = \partial E / \partial x_i$ (metodo comparativo ordinario)
V_{TL}	1	1
V_{C0}	$-N \frac{\bar{\rho}_{w_c}}{\rho_{w_T}(t_P)} [1 - \beta_C \cdot \delta t - \delta\beta \cdot (t_P - t_0)] \approx -N$	$-N \cdot [1 - (t_P - t_0)\delta\beta - (\beta_C - \bar{\alpha})\delta t]$
$\bar{\rho}_{w_c}$	$-\frac{NV_{C0}}{\rho_{w_T}(t_P)} [1 - \beta_C \cdot \delta t - \delta\beta \cdot (t_P - t_0)] \approx -\frac{NV_{C0}}{\rho_{w_T}(t_P)}$	---
ρ_{wT}	$NV_{C0} \frac{\bar{\rho}_{w_c}}{\rho_{w_T}^2(t_P)} [1 - \beta_C \cdot \delta t - \delta\beta \cdot (t_P - t_0)] \approx \frac{NV_{C0}}{\rho_{w_T}^2(t_P)}$	---
β_C	$NV_{C0} \frac{\bar{\rho}_{w_c}}{\rho_{w_T}(t_P)} \delta t \approx NV_{C0} \delta t$	$NV_{C0} \delta t$
t_P	$NV_{C0} \frac{\bar{\rho}_{w_c}}{\rho_{w_T}(t_P)} \delta\beta \approx NV_{C0} \delta\beta$	$NV_{C0} \delta\beta$
δt	$NV_{C0} \frac{\bar{\rho}_{w_c}}{\rho_{w_T}(t_P)} \beta_C \approx NV_{C0} \beta_C$	$NV_{C0} (\beta_C - \bar{\alpha})$
$\delta\beta$	$NV_{C0} \frac{\bar{\rho}_{w_c}}{\rho_{w_T}(t_P)} (t_P - t_0) \approx NV_{C0} (t_P - t_0)$	$NV_{C0} (t_P - t_0)$
$\bar{\alpha}$	---	$-NV_{C0} \delta t$

Metodo volumetrico comparativo ordinario

Questo metodo per trasferimento di volumi viene utilizzato per la verifica delle grosse capacità, generalmente inserite negli impianti di prova, utilizzando come campione di riferimento una misura riferibile avente valore nominale dalle 5 alle 10 volte minore.

L'errore E che compete alla misura è dato, in tal caso, da:

$$E = V_{TL} \cdot [1 + \beta_T(t_P - t_0)] \cdot [1 + \bar{\alpha}(t_0 - t_P)] - \sum V_{C0} [1 + \beta_C(t_i - t_0)] \cdot [1 + \bar{\alpha}(t_0 - t_i)] \quad (3.17)$$

in cui vale la stessa simbologia usata nel precedente paragrafo, avendo indicato con $\bar{\alpha}$ il coefficiente di dilatazione cubica medio dell'acqua.

La (3.17) può essere semplificata eseguendo i prodotti e trascurando gli infinitesimi di ordine superiore al primo:

$$E \approx (V_{TL} - NV_{C0}) + NV_{C0} \cdot [(\beta_T - \bar{\alpha})(t_P - t_0) - (\beta_C - \bar{\alpha})(t_C - t_0)] \quad (3.18)$$

Analogamente a quanto fatto in precedenza, è possibile rendere non correlate le differenze di temperatura, sostituendo le variabili $\delta t = t_P - t_C = (t_P - t_0) - (t_C - t_0)$ e $\delta\beta = \beta_T - \beta_C$ nella (3.18) e ricavando:

$$E = (V_{TL} - NV_{C0}) + NV_{C0} \cdot [(t_P - t_0)\delta\beta - (\beta_C - \bar{\alpha})\delta t] \quad (3.19)$$

Applicando la legge di propagazione delle incertezze [31], i coefficienti di peso c_i , associati alla generica grandezza x_i nella (3.7), vengono riportati nella terza colonna della tabella 3.8.

Esempio di taratura volumetrica

Si supponga di dover verificare una capacità nominale di 50 litri (graduazione della scala 0,05 litri) in acciaio inossidabile ($\beta=4, 8E^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) mediante la tecnica volumetrica. Si utilizza, a riguardo, come campione una capacità nominale di 10 litri; un termometro a bulbo di mercurio con risoluzione pari a 0,1 $^\circ\text{C}$. I dati relativi alla taratura degli strumenti utilizzati sono ricavati dai rispettivi certificati di prova e risultano:

- incertezza di taratura della capacità campione = 0,012 L;
- valore certificato della capacità campione 10,0039 L;
- incertezza di taratura del termometro = 0,2 $^\circ\text{C}$.

Vengono effettuati 5 travasi e per ogni travaso vengono effettuate nell'ordine:

- a) la lettura del livello nella capacità campione (pari al nominale);
- b) la temperatura dell'acqua nella capacità campione.

Al termine del 5° travaso si effettuerà la lettura del livello e della temperatura dell'acqua nella capacità in prova.

I risultati ottenuti sono riassunti in tabella 3.9.

	V_{C0}	t_C	t_P	V_{TL}
1	10,0039	18,3	18,3	---
2	10,0039	18,3	18,3	---
3	10,0039	18,3	18,3	---
4	10,0039	18,4	18,4	---
5	10,0039	18,4	18,4	50,04

La temperatura media dell'acqua nella capacità campione è risultata pari a $t_C = 18,34 \text{ } ^\circ\text{C}$, da cui la densità dell'acqua, calcolata secondo la [68], risulta pari rispettivamente a $\rho_{wC} = 998,5322 \text{ kg/m}^3$ e $\rho_{wT(t_P)} = 998,5308 \text{ kg/m}^3$.

Applicando la relazione semplificata (3.16) l'errore assoluto risulta pari a: $E = 20,6 \text{ mL}$

L'errore relativo risulta pari a: $e = E/V_N = 0,41 \text{ } \%$

Calcolo dell'incertezza

L'incertezza associata alla lettura di V_{TL} è legata alla sua risoluzione. Tenendo presente che le graduazioni della scala vanno da 49,5 a 50,5 L, per una estensione totale della scala pari a 148 mm, l'incertezza di lettura associata ad una capacità discriminante di 1 mm della stessa scala risulta $[(50,5-49,5)/148]*1 = 6,80 \cdot 10^{-3} \text{ L}$

L'incertezza associata alla lettura di V_{C0} è la propagazione dei contributi:

- taratura (normale) 0,012 L

- risoluzione (rettangolare) 0,002 L $\Rightarrow u(V_{CO}) = 6,11 \cdot 10^{-3}$ L

L'incertezza associata alla misura di t_C e t_T è la propagazione dei contributi:

- taratura (normale) 0,2 °C
- risoluzione (rettangolare) 0,1 °C $\Rightarrow u(t) = 0,29$ °C
- disuniformità temperatura nel recipiente (normale) 0,02 °C
- differenze temperatura liquido-recipiente (normale) 0,2 °C

L'incertezza associata alla ρ_w è la propagazione dei contributi:

- incertezza della relazione [68] 0,84 ppm = $8,38 \cdot 10^{-4}$ kg/m³
- incertezza della misura di t_P 0,29 °C $\Rightarrow u(\rho_w) = 5,844 \cdot 10^{-2}$ kg/m³

L'incertezza stimata del valore di β_C (rettangolare) è 10 % = $4,8 \cdot 10^{-6}$ kg/m³ $\Rightarrow u(\beta) = 2,771 \cdot 10^{-6}$ °C⁻¹

I valori su calcolati, i rispettivi coefficienti di peso (estesi e semplificati), nonché la stima del valore dell'incertezza finale associata al volume certificato sono riportati in tabella 3.7.

Tabella 3.7 – Incertezza associata al volume misurato

x_i	c_i	c_i semplificato	$u(x_i)$
V_{TL}	1,000E+00	1,000E+00	6,800E-03
V_{CO}	-5,000E+00	-5,000E+00	6,110E-03
$\bar{\rho}_{wC}$	-5,009E-02	-5,009E-02	5,844E-02
ρ_{wT}	5,009E-02	5,017E-05	5,866E-02
β_C	3,001E+00	3,001E+00	2,771E-06
t_P	0,000E+00	0,000E+00	2,850E-01
δt	2,40E-03	2,40E-03	4,031 E-01
$\delta \beta$	1,701 E-02	1,701E-02	3,919E-06
u(E) in litri			3,16 E-02

La correzione certificata della capacità in prova risulta, dunque $-20,6 \pm 63,2$ mL.