



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

A.a. 2024/2025

Sessione di Laurea: Luglio 2025

Analisi sperimentale delle proprietà fisiche e della contaminazione nei fluidi oleodinamici

Relatori:

Prof. Massimo Rundo

Candidata:

Stefania Evangelista

Correlatori:

Prof. Roberto Finesso

Abstract

La presente tesi analizza in modo approfondito le caratteristiche dei fluidi idraulici utilizzati nei sistemi oleodinamici, con particolare attenzione alla contaminazione e alle tecniche di monitoraggio e filtrazione. Oltre a trasmettere energia, i fluidi oleodinamici svolgono funzioni essenziali come lubrificazione, raffreddamento, protezione dall'usura e dalla corrosione e tenuta tra le componenti del sistema.

La prima parte del lavoro propone un quadro generale delle proprietà fisico-chimiche dei fluidi come densità, viscosità, comprimibilità, tensione di vapore, conducibilità termica e altre, valutandone le variazioni in funzione di temperatura e pressione, per garantirne un uso efficiente e sicuro. Si approfondisce poi la classificazione dei fluidi in base all'origine (minerale, sintetica, biodegradabile o acquosa), con uno studio delle prestazioni, dei limiti operativi e delle normative di riferimento. Viene inoltre analizzato il ruolo degli additivi, utili a migliorare le prestazioni ma potenzialmente responsabili di fenomeni indesiderati in caso di incompatibilità o degrado.

Il focus principale è dedicato alla contaminazione dei fluidi, suddivisa in contaminanti solidi, liquidi e gas disciolti o separati. Vengono illustrate cause, modalità di ingresso e accumulo, oltre agli effetti negativi sulle prestazioni e sulla durata dei componenti. Si presentano inoltre gli strumenti e le metodologie per il rilevamento e la misurazione della contaminazione, con riferimento ai parametri di valutazione e agli standard.

Segue quindi l'analisi delle modalità di filtrazione, elemento chiave per prevenire il degrado del fluido e proteggere l'impianto. Sono descritte le principali tipologie di filtri, la loro collocazione nel circuito, il potere di filtrazione e le strategie per mantenere la pulizia operativa.

La parte finale, di carattere applicativo e sperimentale, presenta prove tecniche condotte in laboratorio su proprietà e contaminazione dei fluidi. Sono stati illustrati strumenti quali viscosimetri (rotazionale, capillare, Engler), densimetro a bilancia e contatore di particelle, impiegati per raccogliere dati utili a verificare il comportamento reale dei fluidi testati. L'approccio sperimentale consente di verificare direttamente, in condizioni operative controllate, i concetti teorici trattati e il comportamento atteso dei fluidi.

L'elaborato si propone quindi di fornire un quadro tecnico e applicativo completo sul comportamento dei fluidi idraulici e sulle strategie di controllo e manutenzione più efficaci per garantirne efficienza, durata e sicurezza nei moderni sistemi oleodinamici.

Indice

1	Proprietà dei fluidi idraulici	11
1.1	Densità.....	11
1.1.1	Definizione.....	11
1.1.2	Influenza della temperatura e pressione.....	11
1.2	Viscosità	11
1.2.1	Definizione.....	11
1.2.2	Influenza della temperatura e pressione.....	12
1.3	Modulo di comprimibilità	14
1.3.1	Definizione.....	14
1.3.2	Influenza della temperatura e pressione.....	14
1.4	Tensione di vapore	15
1.4.1	Definizione.....	15
1.4.2	Influenza della temperatura e pressione.....	15
1.5	Coefficiente di espansione termica.....	16
1.5.1	Definizione	16
1.5.2	Influenza della temperatura e pressione.....	16
1.6	Potere lubrificante	16
1.6.1	Definizione.....	16
1.6.2	Influenza della temperatura e della pressione	17
1.7	Proprietà aggiuntive	17
2.	Classificazione dei fluidi idraulici	19
2.1	Oli minerali.....	20
2.1.1	Composizione e caratteristiche generali	20
2.1.2	Prestazioni e limiti operativi.....	20
2.1.3	Applicazioni e normative di riferimento	20
2.2	Fluidi a base di acqua	21
2.2.1	Composizione e caratteristiche generali	21
2.2.2	Prestazioni e limiti operativi	21
2.2.3	Applicazioni e normative di riferimento	21
2.3	Miscele con acqua	22
2.3.1	Composizione e caratteristiche generali	22
2.3.2	Prestazioni e limiti operativi	22
2.3.3	Applicazioni e normative di riferimento	22

2.4	Fluidi sintetici.....	23
2.4.1	Composizione e caratteristiche generali	23
2.4.2	Prestazioni e limiti operativi	23
2.4.3	Applicazioni e normative di riferimento	23
2.5	Oli biodegradabili.....	23
2.5.1	Composizione e caratteristiche generali	23
2.5.2	Prestazioni e limiti operativi	24
2.5.3	Applicazioni e normative di riferimento	24
2.6	Riepilogo e confronto tra i diversi fluidi	24
3	Contaminazione dei fluidi.....	26
3.1	Tipologie di contaminazione	26
3.1.1	Contaminazione solida.....	26
3.1.2	Contaminazione liquida.....	27
3.1.3	Contaminazione gassosa	29
3.2	Origini della contaminazione	30
3.2.1	Origine della contaminazione solida.....	30
3.2.2	Origine della contaminazione liquida	31
3.2.3	Origine della contaminazione gassosa	31
3.3	Effetti della contaminazione.....	32
3.3.1	Effetti della contaminazione solida.....	32
3.3.2	Effetti della contaminazione liquida	33
3.3.3	Effetti della contaminazione gassosa	34
3.3.4	Effetti globali della contaminazione	34
3.3.5	Effetto degli additivi come potenziali contaminanti	35
3.4	Metodi e strumenti per la misura della contaminazione.....	36
3.4.1	Rilevamento della contaminazione solida.....	36
3.4.2	Rilevamento della contaminazione liquida	38
3.4.3	Rilevamento della contaminazione gassosa	39
4.	Filtrazione	41
4.1	Dispositivo di filtrazione.....	41
4.1.1	Elemento filtrante.....	41
4.1.2	Valvola di bypass	43
4.1.3	Indicatore d'intasamento.....	43
4.2	Proprietà dei filtri	45

4.2.1	Efficienza di filtrazione.....	45
4.2.2	Capacità di ritenzione dei contaminanti.....	46
4.2.3	Resistenza al collasso.....	46
4.2.4	Compatibilità chimica.....	47
4.2.5	Stabilità termica.....	47
4.2.6	Proprietà aggiuntive.....	47
4.3	Tecniche di filtrazione.....	48
4.3.1	Filtrazione di superficie.....	48
4.3.2	Filtrazione di profondità.....	49
4.3.3	Confronto tra filtrazione di superficie e filtrazione di profondità.....	50
4.4	Collocazione dei filtri.....	51
4.4.1	Filtro in aspirazione.....	51
4.4.2	Filtro in mandata.....	53
4.4.3	Filtro in scarico.....	54
4.4.4	Filtro off line.....	55
4.4.5	Filtro di sfiato dell'aria.....	56
4.5	Filtri con configurazioni particolari.....	57
4.5.1	Filtri spin-on.....	57
4.5.2	Filtri autopulenti.....	58
4.5.3	Filtri duplex.....	59
4.5.4	Filtri magnetici.....	59
5.	Strumentazione.....	61
5.1	Viscosimetro rotazionale.....	61
5.1.1	Funzionamento.....	61
5.1.2	Misurazioni.....	62
5.1.3	Analisi risultati.....	68
5.2	Viscosimetro Engler.....	69
5.2.1	Funzionamento.....	69
5.2.2	Misurazioni.....	70
5.2.3	Analisi Risultati.....	71
5.3	Viscosimetro capillare.....	73
5.3.1	Funzionamento.....	73
5.4	Densimetro a bilancia.....	75
5.4.1	Funzionamento.....	76

5.4.2	Misurazioni	77
5.4.3	Analisi risultati.....	77
5.5	Contatore di particelle	79
5.5.1	Funzionamento.....	79
5.5.2	Misurazioni	81
5.5.3	Analisi e confronto risultati.....	84
6.	Conclusione.....	85
	Bibliografia	86

Indice delle figure

Capitolo 1

Figura 1.1 Andamento della viscosità in funzione della temperatura e dell' IV	13
---	----

Capitolo 2

Figura 2.1 Classificazione fluidi idraulici	19
---	----

Capitolo 3

Figura 3.1 Contaminazione solida	27
Figura 3.2 Contaminazione liquida	28
Figura 3.3 Concentrazione dell' acqua in funzione della temperatura dell' olio	28
Figura 3.4 Contaminazione gassosa	29
Figura 3.5 Abrasione fra due superfici in movimento	32
Figura 3.6 Abrasione su pompa a palette	33
Figura 3.7 Effetto della cavitazione in una pompa	34
Figura 3.8 Diagramma a blocchi per anomalie in un sistema oleoidraulico	35
Figura 3.9 Microscopio ottico	38
Figura 3.10 Esempio di DGA	40

Capitolo 4

Figura 4.1 Simbolo generico di un filtro	41
Figura 4.2 elemento filtrante	42
Figura 4.3 cartuccia filtrante	42
Figura 4.4 valvola di bypass	43
Figura 4.5 Indicatore di intasamento	44
Figura 4.6 Indicatori di intasamento ottici ed elettrici	44
Figura 4.7 Schema multi-pass test	45
Figura 4.8 Elemento filtrante di superficie con maglia quadrata	48
Figura 4.9 Elemento filtrante di superficie con filo metallico triangolare	48
Figura 4.10 Processo di filtrazione di profondità	49
Figura 4.11 Confronto fra filtrazione di superficie e di profondità	51
Figura 4.12 Schema generico per filtro in aspirazione	52
Figura 4.13 Sezione di un filtro in aspirazione	52
Figura 4.14 Schema generico per filtro in mandata	53
Figura 4.15 Sezione di un filtro in mandata	53
Figura 4.16 Schema generico per filtro in scarico	54
Figura 4.17 Sezione di un filtro in scarico	54
Figura 4.18 Modalità di montaggio di filtri in scarico	55

Figura 4.19 Schema generico per filtrazione off-line	56
Figura 4.20 Filtri spin-on	58
Figura 4.21 Filtri autopulenti	58
Figura 4.22 Filtri duplex	59
Figura 4.23 Filtro con colonna magnetica	59

Capitolo 5

Figura 5.1 Viscosimetro rotazionale	62
Figura 5.2 Testa del viscosimetro rotazionale con display	62
Figura 5.3 Sonda di temperatura	63
Figura 5.4 Fase di azzeramento automatico	63
Figura 5.5 Regolazione della testa	64
Figura 5.6 Settaggio della durata della prova	64
Figura 5.7 Valore di viscosità rilevato a 27°C	65
Figura 5.8 Temperatura del fluido rilevata a 27°C	65
Figura 5.9 Percentuale di coppia rilevata a 27°C	66
Figura 5.10 Cambio di velocità di rotazione a 40°C	67
Figura 5.11 Percentuale di coppia rilevata a 40°C	67
Figura 5.12 Valore di viscosità rilevato a 40°C	67
Figura 5.13 Curva temperatura- viscosità	68
Figura 5.14 Viscosimetro Engler	69
Figura 5.15 Viscosimetro Engler livellato e timer	70
Figura 5.16 Riempimento del serbatoio con olio	71
Figura 5.17 Strumentazione utilizzata col viscosimetro Engler	71
Figura 5.18 Tempo di efflusso registrato a 60°C	72
Figura 5.19 Curva viscosità- temperatura per viscosimetro Engler	73
Figura 5.20 Viscosimetro capillare	74
Figura 5.21 Strumentazione utilizzata col densimetro Mohr-Westphal	76
Figura 5.22 Principio di funzionamento	77
Figura 5.23 Misura della densità a 20°C	78
Figura 5.24 Misura della densità a 40 °C	78
Figura 5.25 Misura della densità a 60 °C	78
Figura 5.26 Curva densità- temperatura	79
Figura 5.27 Contatore di particelle Pall	80
Figura 5.28 Zoom del display del contatore di particelle Pall	80
Figura 5.29 Fase di flussaggio	82
Figura 5.30 Risultato finale del primo impianto	83
Figura 5.31 Risultato finale del secondo impianto	83

Indice delle tabelle

Tabella 1.1 ISO VG -Classe di viscosità cinematica	13
Tabella 2.1 Classificazione degli oli minerali secondo gli additivi ammessi	21
Tabella 2.2 Normativa oli biodegradabili	24
Tabella 4.1 Confronto tra filtrazione di superficie e di profondità	50
Tabella 5.1 Tempi di efflusso e viscosità registrate.....	72

1 Proprietà dei fluidi idraulici

I fluidi idraulici sono elementi fondamentali nei sistemi di trasmissione di potenza e controllo, in quanto permettono di trasmettere l'energia meccanica sotto forma di pressione. È importante conoscere e controllare le proprietà fisiche e chimiche dei fluidi per garantire delle ottime prestazioni. Infatti, queste proprietà influenzano l'efficienza, l'affidabilità e la sicurezza del sistema.

In questo capitolo vengono descritte le caratteristiche delle principali proprietà dei fluidi idraulici, facendo anche un focus sulla loro dipendenza da pressione e temperatura.

1.1 Densità

1.1.1 Definizione

La densità (ρ) si può esprimere come rapporto tra la massa e il volume del fluido:

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

È una proprietà fondamentale per i calcoli energetici e per il bilancio delle masse nei sistemi idraulici. [1]

1.1.2 Influenza della temperatura e pressione

La densità varia con la temperatura e, in misura minore, con la pressione. Aumentando la temperatura, la densità tende a diminuire a causa della dilatazione termica del fluido. L'effetto della pressione, sebbene generalmente trascurabile nei liquidi, può essere rilevante nei casi in cui si raggiungono pressioni elevate, come nei sistemi idraulici industriali.

È importante ricordare che i fluidi sono acquistati a peso, ma i parametri idraulici sono calcolati in volume; pertanto la conoscenza del valore di densità deve essere rapportato al giusto volume richiesto dall' impianto.

I valori tipici per un olio idraulico vanno dagli 860 ai 900 kg/m^3 . [1]

1.2 Viscosità

1.2.1 Definizione

La viscosità è la misura della resistenza del fluido allo scorrimento e rappresenta una delle proprietà più critiche nei sistemi oleodinamici.

La viscosità dinamica (μ) è espressa in $\text{Pa} \cdot \text{s}$ o $\text{mPa} \cdot \text{s}$. La viscosità cinematica (ν) è il rapporto tra la viscosità dinamica e la densità del fluido:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \text{ [} \frac{\text{mm}^2}{\text{s}} \text{ o cSt]}$$

$$1 \text{ cSt} = 1 \text{ mm}^2/\text{s}$$

La viscosità può essere definita fisicamente come l'attrito interno dovuto al moto tra le particelle componenti la massa liquida o, più semplicemente, la resistenza che oppone il fluido allo scorrimento.

Un fluido con viscosità troppo elevata può causare perdite di carico elevate e perdita di energia, al contrario un fluido poco viscoso non garantisce la lubrificazione adeguata e quindi può causare usura dei componenti.

Essa influisce in modo inversamente proporzionale sulla portata volumetrica di un liquido a parità di pressione e geometria del condotto, poiché un liquido molto denso e viscoso genera attrito interno e con le pareti e quindi rallenta il flusso.

Questo comportamento può essere spiegato grazie alla legge di Poiseuille:

$$Q = \frac{\pi \cdot \Delta p \cdot r^4}{8 \cdot \mu \cdot L}$$

dove:

- Q è la portata volumetrica,
- Δp è la differenza di pressione,
- r è il raggio del condotto,
- μ è la viscosità dinamica del liquido,
- L è la lunghezza del condotto.

Come è possibile notare, la portata volumetrica è inversamente proporzionale alla viscosità μ quindi un liquido più viscoso scorre più lentamente e quindi la portata volumetrica sarà minore; al contrario un liquido meno viscoso scorrerà più velocemente aumentando la portata. [1]

1.2.2 Influenza della temperatura e pressione

La viscosità è fortemente dipendente dalla temperatura: all'aumentare della temperatura, la viscosità diminuisce. Questo perché, con l'aumento della temperatura, le molecole del fluido si muovono più velocemente riducendo le forze di coesione interne che oppongono resistenza allo scorrimento e questo rende il fluido meno viscoso. Un parametro che quantifica la variazione della viscosità in funzione della temperatura è l'indice di viscosità, abbreviato IV: all'aumentare dell'IV diminuisce la sensibilità alla variazione di temperatura. Tale comportamento è illustrato nella figura 1.1, che confronta l'andamento della viscosità al variare della temperatura per un fluido con indice di viscosità basso e uno con indice elevato. Poiché la relazione non sarà propriamente lineare, l'asse y non avrà scala lineare.

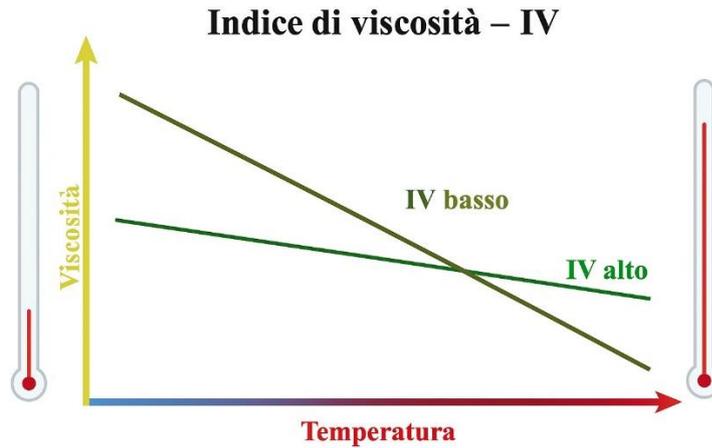


Figura 1.1 Andamento della viscosità in funzione della temperatura e dell' IV

Le variazioni con la pressione, invece, sono generalmente trascurabili nei range di funzionamento tipici, ma possono diventare significative ad alte pressioni. (oltre i 300 bar).

Una classificazione dei fluidi idraulici in base alla viscosità, mostrata in tabella 1.1, è stabilita dalle norme ISO VG (viscosity grade) che misura il valore di viscosità cinematica in cSt effettuando tre rilevazioni alle temperature di 0°C, 40°C, 100°C; il numero indicato nella sigla si riferisce alla viscosità a 40°C. [1]

ISO-CLASSE DI VISCOSITA' CINEMATICA ν (mm^2/s o cSt)			
Classe	ν max (0°C)	ν media (40°C) e limite min-max	ν min (100°C)
ISO VG 10	90	10 (9-11)	2,4
ISO VG 22	300	22 (19,8-24,2)	4,1
ISO VG 32	420	32 (28,8-35,2)	5
ISO VG 46	780	46 (41,1-50,6)	6,1
ISO VG 68	1400	68 (61,2-74,8)	7,8
ISO VG 100	2560	100 (90-110)	9,9

Tabella 1.1 ISO VG -Classe di viscosità cinematica

1.3 Modulo di comprimibilità

1.3.1 Definizione

Il modulo di comprimibilità (o modulo di elasticità volumetrico), indicato con β , rappresenta la resistenza di un fluido alla variazione di volume quando sottoposto a pressione e quindi misura la pressione necessaria per ottenere una determinata compressione. È definito come:

$$\beta = -V \cdot \frac{dP}{dV} [Pa]$$

Un alto valore di β indica che è necessaria una pressione significativa per ottenere una variazione apprezzabile di volume, quindi il fluido si comporta in modo rigido. Al contrario, un valore basso significa che anche una piccola pressione è sufficiente a comprimere il fluido, che risulta quindi più deformabile o comprimibile.

Tale parametro rappresenta l'inverso del coefficiente di comprimibilità volumetrica, indicato con k , che misura la variazione del volume di un fluido al variare della pressione, ovvero la facilità con cui il fluido si comprime in seguito a un aumento di pressione. È definito come:

$$k = \frac{1}{\beta} [1/Pa]$$

Più è grande, più il fluido si deforma ed è quindi comprimibile.

Sebbene i fluidi idraulici vengano concepiti come incomprimibili, in realtà qualsiasi fluido sottoposto a pressione è comprimibile: per esempio, l'acqua ha un valore di β di circa 2200 MPa, mentre oli idraulici di 1000–2000 MPa, poiché sono più comprimibili dell'acqua.

Derivando e facendo le opportune sostituzioni, si può esprimere il parametro β in funzione della densità ρ e capire il legame tra i due valori.

$$\beta = \rho \cdot \frac{dP}{d\rho} [Pa]$$

Quindi maggiore è la densità, più il fluido sarà sensibile a variazioni di pressione e più grande sarà β . Nel caso di liquidi, considerati quasi incomprimibili, il modulo di comprimibilità sarà elevato perché per avere una variazione di densità è necessaria una grande variazione di pressione. [1]

1.3.2 Influenza della temperatura e pressione

Il modulo di comprimibilità β varia con la temperatura e, più lievemente, con la pressione. All'aumentare della temperatura, β tende a diminuire, e di conseguenza il fluido diventa più comprimibile. Questa tendenza si verifica perché le forze intermolecolari si riducono e quindi risulta più facile generare una variazione di volume sotto pressione.

Al contrario, un incremento della pressione comporta un aumento di β , poiché le molecole del fluido, che hanno già subito una compressione, oppongono più resistenza a ulteriori riduzioni di volume e quindi il fluido è meno comprimibile.

Ecco perché è importante considerare tutti questi effetti quando si progettano sistemi in cui la risposta del fluido deve essere rapida e controllata, come ad esempio nei servomeccanismi o nei sistemi di controllo di posizione. Infatti, in questi impianti, se il fluido è troppo comprimibile può causare ritardi, indebolire la trasmissione della pressione e introdurre problemi nel controllo del movimento. Inoltre, la comprimibilità influisce anche sulla rigidità del sistema compromettendo la stabilità e l'efficienza.

Per questo motivo bisogna conoscere e compensare gli effetti della temperatura e della pressione su β per garantire prestazioni sicure e costanti. [1]

1.4 Tensione di vapore

1.4.1 Definizione

La tensione di vapore indica il punto in cui il liquido si trasforma in vapore, e quindi la pressione assoluta alla quale un liquido inizia a evaporare a una determinata temperatura. Quando la pressione esterna sul liquido scende fino ad eguagliare la tensione di vapore che corrisponde alla temperatura presente, il liquido entra in ebollizione.

È un parametro importante da monitorare al fine di prevenire il fenomeno della cavitazione, ovvero la formazione di bolle di vapore che possono implodere.

Per questo motivo, conoscere questo parametro è fondamentale in fase di progettazione per evitare la cavitazione e di conseguenza i danni meccanici che questo fenomeno comporta. A tal fine è necessario assicurarsi che la pressione di esercizio sia sempre superiore alla tensione di vapore a quella temperatura. [1]

1.4.2 Influenza della temperatura e pressione

La tensione di vapore di un liquido è molto influenzata dalla temperatura; la pressione esterna invece influenza il punto di ebollizione del liquido.

In particolare, la tensione di vapore aumenta all'aumentare della temperatura, seguendo la relazione esponenziale descritta dalla legge di Clausius-Clapeyron. Questo comportamento è dovuto al fatto che l'energia termica fornita al liquido facilita la trasformazione delle molecole dallo stato liquido a quello di vapore, incrementando così la pressione esercitata dal vapore in equilibrio con il liquido.

La pressione esterna determina invece la temperatura alla quale il liquido bolle. Quando la pressione esterna è elevata, il liquido necessita di una temperatura più alta per raggiungere la sua tensione di vapore e iniziare l'ebollizione. In condizioni di pressione ridotta, come ad altitudini elevate, la temperatura di ebollizione diminuisce perché la tensione di vapore corrisponde alla pressione esterna a valori più bassi. [1]

1.5 Coefficiente di espansione termica

1.5.1 Definizione

Il coefficiente di espansione termica, indicato con α , indica quanto il fluido, mantenuto a pressione costante, riesce a cambiare volume a seguito di una variazione di temperatura. È definito come:

$$\alpha = \frac{1}{V} \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \text{ [}^\circ\text{C}^{-1} \text{ o } \text{K}^{-1}\text{]}$$

Questo fenomeno accade nei liquidi, e soprattutto negli oli, poiché quando la temperatura aumenta, le molecole si muovono più velocemente e di conseguenza si allontanano di più, aumentando quindi le distanze intermolecolari. L' aumento di volume generato dall' espansione termica porterà ad una riduzione di densità.

Se si vuole valutare le variazioni di livello nei serbatoi o le possibili sovrappressioni in circuiti chiusi è importante monitorare questo parametro. [2]

1.5.2 Influenza della temperatura e pressione

Il coefficiente di espansione termica aumenta all'aumentare della temperatura. Questo perché, quando aumenta la temperatura, le molecole si muovono più velocemente aumentando la loro energia cinetica. Di conseguenza le distanze intermolecolari aumentano perché le molecole si allontanano di più e quindi si espanderanno più facilmente.

Al contrario, un incremento della pressione tende a diminuire il coefficiente di espansione termica. Questa diminuzione è dovuta al fatto che le molecole di fluido che hanno già subito una compressione e sono vicine tra loro non riescono a separarsi facilmente poiché oppongono una maggiore resistenza all'espansione. Di conseguenza il fluido si espande meno con l'aumento di temperatura.

Negli oli idraulici e lubrificanti, bisogna comprendere come varia questo parametro per diverse ragioni. Per esempio, nei sistemi idraulici chiusi, se la temperatura aumenta l'olio si espande. Ma se lo spazio non è abbastanza e non c'è modo di compensare questa dilatazione, la pressione all'interno può salire molto, mettendo a rischio i componenti del sistema. È quindi fondamentale monitorare questo coefficiente e le sue variazioni soprattutto per la progettazione di serbatoi di espansione, per il dimensionamento dei tubi e per l'accuratezza dei sistemi di misura volumetrici. [2]

1.6 Potere lubrificante

1.6.1 Definizione

Il potere lubrificante di un fluido è la capacità di insinuarsi e rimanere tra le parti in movimento, formando dunque una pellicola protettiva che ha il compito di separare fisicamente le parti in contatto, impedendo così l'attrito diretto e l'usura tra di esse.

Questa proprietà è fondamentale affinché i componenti meccanici funzionino nel modo corretto e siano affidabili, specialmente nei sistemi in cui è richiesta la trasmissione di potenza o il movimento preciso, come accade con gli oli idraulici e i lubrificanti.

Un buon potere lubrificante minimizza le perdite di energia dovute all'attrito e al calore e previene anche danni come grippaggi, abrasioni e vaiolatura. A tal proposito è importante distinguere i due regimi principali di lubrificazione:

- Idrodinamico: il film di lubrificante supporta tutti gli elementi solidi e separa completamente le due superfici; di conseguenza l'attrito e l'usura saranno bassi.
- Limite: il film di lubrificante non è in grado di sostenere nulla e quindi l'attrito è molto elevato

La naturale proprietà lubrificante del fluido può essere migliorata con l'aggiunta di additivi AW "Anti-wear" (antiusura) o EP (extreme pressure). Gli additivi AW più comuni sono a base di zinco o fosforo e impediscono l'incollaggio delle particelle che si sono staccate; gli additivi EP, usati nella lubrificazione limite, sono a base di zolfo, cloro, fosforo e a differenza dell'AW che si attiva con l'innalzarsi della temperatura, questi esercitano la loro funzione in condizioni di pressione superiori ai 200-250 bar. [1]

1.6.2 Influenza della temperatura e della pressione

La temperatura e la pressione influenzano il potere lubrificante soprattutto perché agiscono sulla viscosità del fluido, come si è visto nel paragrafo 1.2.2.

La viscosità ha infatti un impatto diretto e fondamentale sul potere lubrificante di un olio poiché permette all'olio di formare un sottile film lubrificante tra le superfici in movimento. Se il fluido non è abbastanza viscoso, il film non riesce a separare le parti e questo genererà attrito e usura. Ma anche un fluido troppo viscoso può essere dannoso perché potrebbe generare attrito interno che aumenta le perdite di energia. Di conseguenza il fluido rallenta e, soprattutto nella fase di avvio, potrebbe non essere capace di raggiungere in tempo tutte le zone da lubrificare.

Quindi risulta fondamentale bilanciare la viscosità correttamente e trovare il giusto equilibrio affinché l'olio riesca a creare e mantenere il film protettivo di lubrificante per una corretta lubrificazione. [1]

1.7 Proprietà aggiuntive

Oltre alle proprietà fondamentali discusse, verranno brevemente descritte altre caratteristiche per la selezione e la gestione dei fluidi idraulici, influenzando direttamente le loro prestazioni e la sicurezza operativa.

Il punto di scorrimento (pour point) è la temperatura più bassa alla quale il fluido riesce a fluire sotto gravità e quindi senza aver bisogno di alcun aiuto. Se la temperatura scende al di sotto di questo parametro la viscosità aumenta troppo, il fluido diventa troppo denso e quindi non riesce più a scorrere come dovrebbe e svolgere le sue funzioni. Questo parametro è importante per garantire un'adeguata circolazione e lubrificazione, specialmente nelle fasi di avviamento a freddo dei sistemi.

La demulsività indica la capacità di un fluido di separare o respingere rapidamente l'acqua con cui viene a contatto. La principale causa di presenza d'acqua nell' impianto è dovuta alla condensazione dell'umidità atmosferica presente all' interno della parte superiore del serbatoio. È quindi fondamentale monitorarla per prevenire la formazione di emulsioni stabili, che possono compromettere il potere lubrificante, favorire la corrosione, ostruire i filtri e accelerare il degrado del fluido.

La durata attiva del fluido, o vita utile, è il periodo in cui il fluido mantiene le sue proprietà e prestazioni senza perdere efficienza. Questo parametro dipende da diversi fattori come ad esempio la temperatura a cui si lavora, il livello di contaminazione, la presenza di ossigeno e quanto sono efficaci gli additivi. Per esempio, se si lavora a temperature troppo elevate si può accelerare l'ossidazione e quindi degradare il fluido più rapidamente. Bisogna quindi aggiungere gli additivi giusti e nelle corrette quantità per poter aumentare la durata attiva del fluido il più possibile.

Infine, il punto di infiammabilità (flash point) e il punto di combustione (fire point) sono parametri importanti per poter valutare la sicurezza degli impianti. Il punto di infiammabilità è la temperatura più bassa alla quale il fluido produce vapori sufficienti che possono accendersi se mescolati con l'aria; il punto di combustione è la temperatura alla quale il fluido si incendia e continua a bruciare per almeno cinque secondi. È importante conoscere questi parametri per valutare il rischio di incendio o esplosione in ambienti operativi, soprattutto in presenza di alte temperature. [1]

2. Classificazione dei fluidi idraulici

I fluidi idraulici non si limitano a svolgere la funzione di trasmissione di potenza, ma sono anche fondamentali per la lubrificazione, il raffreddamento, la protezione contro l'usura e la corrosione, nonché per la tenuta tra componenti. La scelta del fluido più adatto dipende da numerosi fattori, tra cui le condizioni operative, la compatibilità con i materiali del sistema, la temperatura d'esercizio, l'impatto ambientale e la normativa vigente.

La figura 2.1 mostra una panoramica delle principali categorie di fluidi presenti nell'oleidraulica che possono essere distinti in:

- Oli minerali
- Fluidi a base d'acqua
- Miscele con acqua
- Fluidi sintetici
- Oli biodegradabili

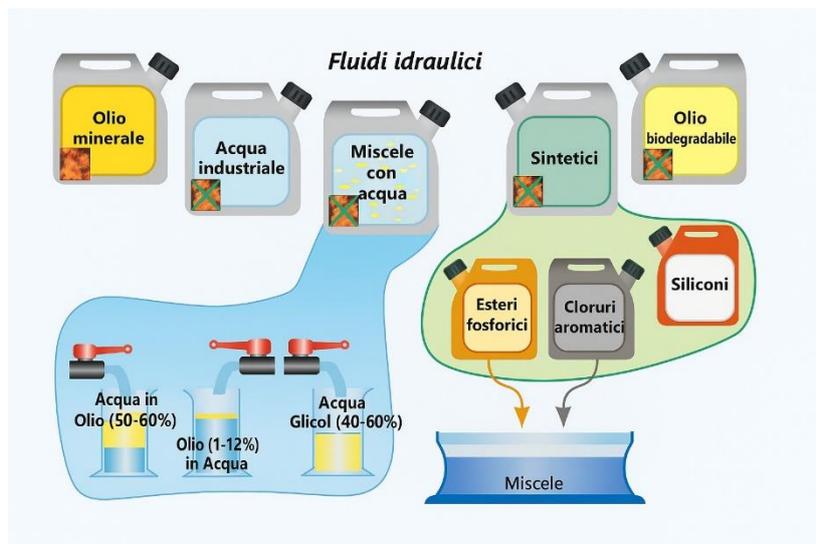


Figura 2.1 Classificazione fluidi idraulici

A queste categorie si aggiunge la possibilità di impiegare additivi specifici per migliorare le prestazioni del fluido base, tra cui antiossidanti, antiusura, inibitori di corrosione e modificatori di viscosità.

Nei paragrafi seguenti si approfondiscono le caratteristiche, i vantaggi e i limiti delle diverse tipologie di fluidi, nonché i criteri di selezione più comuni in ambito tecnico. [1]

2.1 Oli minerali

2.1.1 Composizione e caratteristiche generali

Gli oli minerali rappresentano la tipologia più comune di fluidi idraulici, ottenuti dalla raffinazione del petrolio grezzo tramite distillazione frazionata. Sono composti principalmente da una miscela di alcani a catena lunga (contenenti circa 15-40 atomi di carbonio)

Questi fluidi si distinguono per una buona stabilità chimica, caratteristiche lubrificanti efficaci, tossicità moderata, costo contenuto, facile reperibilità e bassa volatilità che limita le perdite per evaporazione. Sono dei buoni conduttori del calore e generalmente compatibili con i materiali comunemente impiegati nei sistemi idraulici, come guarnizioni ed elastomeri, e mostrano un discreto comportamento alle basse e alte temperature, specialmente se additivati. [1]

2.1.2 Prestazioni e limiti operativi

Le prestazioni degli oli minerali dipendono dalla loro viscosità e dal relativo indice di viscosità (VI), parametro che esprime quanto la viscosità varia al variare della temperatura: come già discusso nel paragrafo 1.2.2, maggiore è il VI, più stabile sarà il comportamento del fluido

Gli oli minerali offrono buona conducibilità termica per dissipare il calore generato nei circuiti, non formano depositi significativi a temperatura moderata e possono essere anche utilizzati in un ampio intervallo di temperature. Nei sistemi idraulici è raccomandato evitare temperature oltre i 75 °C e comunque non superare picchi oltre i 100 °C.

Tuttavia, in applicazioni con temperature molto basse o molto elevate, possono manifestare aumento eccessivo della viscosità a freddo, degradazione termica e ossidativa a caldo, riduzione della durata utile del fluido (invecchiamento precoce). Inoltre sono caratterizzati da un' alta infiammabilità che li rende i peggiori fluidi idraulici resistenti al fuoco.

Per compensare queste criticità, gli oli minerali vengono additivati con antiossidanti, antiusura (AW), antischiuma, anticorrosivi, che migliorano l'indice di viscosità. [1]

2.1.3 Applicazioni e normative di riferimento

Gli oli minerali vengono utilizzati soprattutto in impianti industriali, macchine movimento terra, sistemi mobili e stazionari, poiché sono abbastanza economici e presentano buone proprietà lubrificanti. Sono anche utilizzati nei laboratori per prove comparative e test con strumenti come viscosimetri e densimetri.

In ambito normativo, sono classificati secondo le specifiche DIN 51524 e ISO 6743-4 in base alla formulazione degli additivi presenti in essi. Nella tabella seguente sono riportate le principali sigle e il relativo tipo di additivazione, secondo le due classificazioni:

CLASSIFICAZIONE DEGLI OLI MINERALI SECONDO GLI ADDITIVI IMMESSI		
DIN (sigla)	Additivazione	ISO (sigla)
H	Nessuna	HH
HL	Antiruggine +Antiossidante+ Antischiuma	HL

HLP	Antiruggine +Antiossidante+ Antischiuma+ Antiusura	HM
HLP-D	HLP+Detergente+ Disperdente	Non previsto
Non previsto	HM+additivi per migliorare l' indice di viscosità IV	HV

Tabella 2.1 Classificazione degli oli minerali secondo gli additivi ammessi

È importante notare che, pur essendo la ISO il riferimento tecnico principale, la sigla DIN è ancora comunemente indicata in molte schede tecniche commerciali. [1]

2.2 Fluidi a base di acqua

2.2.1 Composizione e caratteristiche generali

L'acqua, decantata e opportunamente filtrata per depurarla da scorie, ruggine, particelle metalliche ecc., è stata storicamente uno dei primi fluidi utilizzati nei sistemi idraulici grazie alla sua disponibilità, basso costo, incomprimibilità e totale assenza di infiammabilità. Dal punto di vista termofisico, presenta un elevato calore specifico e una densità relativamente alta, rendendola efficace nel dissipare calore generato durante il funzionamento. Tuttavia, la sua bassa viscosità e l'assenza di proprietà lubrificanti naturali rappresentano limiti critici per l'uso in impianti che prevedono componenti meccanici in movimento. [1]

2.2.2 Prestazioni e limiti operativi

Dunque, come già accennato, i principali vantaggi dell'acqua come fluido idraulico sono: infiammabilità nulla, ideale per ambienti ad alto rischio di incendio, bassa comprimibilità che garantisce un'adeguata velocità di risposta e compatibilità ambientale, essendo una sostanza neutra e antinquinante.

Tuttavia, l'acqua presenta anche numerosi svantaggi tecnici tra cui la scarsissima capacità lubrificante che causa attrito e usura precoce, tendenza alla corrosione, rischio di cavitazione a causa della bassa viscosità. [1]

2.2.3 Applicazioni e normative di riferimento

Per i motivi prima citati, l'acqua viene raramente usata da sola nei sistemi idraulici moderni. L'impiego dell'acqua pura come fluido idraulico è oggi limitato a casi speciali o applicazioni sperimentali, per esempio se sono presenti rischi di infiammabilità o inquinamento o in sistemi provvisti di componenti in bronzo, acciaio inox e altri materiali resistenti alla ruggine. [1]

In generale, l'acqua pura non è normata come fluido idraulico secondo gli standard ISO 6743-4, che trattano invece delle miscele a base d'acqua che verranno analizzate nel successivo paragrafo.

2.3 Miscele con acqua

2.3.1 Composizione e caratteristiche generali

Le miscele a base di acqua rappresentano un'alternativa rispetto all'impiego dell'acqua pura, con l'obiettivo di migliorare le proprietà lubrificanti e aumentare la compatibilità con i materiali. Le principali tipologie sono:

- HF-A (olio in acqua): emulsioni con contenuto di olio variabile dal 1% al 12%
- HF-B (acqua in olio): emulsioni con contenuto di olio variabile dal 50% al 60%
- HF-C (acqua-glicole): soluzioni con contenuto di glicol variabile dal 40% al 60% e vari additivi [1]

2.3.2 Prestazioni e limiti operativi

Queste miscele migliorano le proprietà dell'acqua introducendo viscosità, lubrificazione e protezione contro corrosione, schiuma e crescita batterica. In particolare:

- HFA garantiscono un'ottima resistenza al fuoco, evitano congelamenti in impianti collocati all'aperto, sono compatibili con elastomeri e vernici e hanno un buon rapporto tra viscosità e temperatura. Tuttavia richiedono un controllo del pH e presentano una lubrificazione piuttosto limitata. Inoltre necessitano di sistemi di filtrazione specifici, privi di componenti in zinco per evitare corrosione, preferibilmente realizzati in acciaio inox o nichelato, con elementi filtranti a rete metallica o fibra multipla per garantire elevata pulizia del fluido, durata prolungata dell'emulsione, riduzione dell'usura su pompe e componenti, miglior efficienza e qualità del processo produttivo. La scelta accurata del filtro è quindi fondamentale per mantenere pulito il fluido, salvaguardare la macchina e garantire sicurezza antincendio;
- HFB presentano un potere lubrificante più alto rispetto agli HFA e talvolta si aggiungono degli additivi per migliorarne le proprietà. Sono poco infiammabili e sono compatibili con vernici ed elastomeri ma sono soggetti a instabilità termica e meno diffusi;
- HFC sono tra i più utilizzati tra quelli a base acquosa, grazie al buon compromesso tra sicurezza antincendio e prestazioni tecniche. Offrono infatti una buona resistenza al fuoco essendo poco infiammabili e hanno viscosità leggermente superiore agli HFB. Tuttavia però presentano prestazioni lubrificanti modeste e sono incompatibili con le parti zincate, guarnizioni di Vulkollan e la maggior parte delle vernici, richiedendo quindi particolare attenzione nella scelta dei materiali impiegati.

Tuttavia, rispetto agli oli minerali, tutte queste soluzioni presentano un modulo di comprimibilità inferiore e una maggiore tendenza all'evaporazione, rendendole meno adatte a impianti ad alta pressione. [1] [3]

2.3.3 Applicazioni e normative di riferimento

Le miscele acqua/olio e acqua/glicole trovano in generale applicazioni in ambienti a rischio incendio elevato:

- HFA: acciaierie, miniere, saldature;
- HFB: poco usati;
- HFC: molto diffusi nel settore minerario, siderurgico, ferroviario.

Le normative ISO 6743-4 e 12922 definiscono le caratteristiche minime, mentre enti come Factory Mutual rilasciano certificazioni FM sulla resistenza al fuoco. [3]

2.4 Fluidi sintetici

2.4.1 Composizione e caratteristiche generali

I fluidi sintetici sono prodotti da basi non minerali, come esteri fosforici, esteri sintetici, cloruri aromatici, siliconi e miscele. La loro composizione è pensata affinché questi fluidi siano più stabili rispetto agli oli minerali, specialmente se le temperature diventano troppo elevate. [1]

2.4.2 Prestazioni e limiti operativi

I fluidi sintetici si distinguono per l'ottima resistenza all'ossidazione, alla degradazione termica e all'infiammabilità (nel caso di esteri fosfati). Offrono livelli di viscosità uniformi garantendo un buon potere lubrificante, una lunga vita utile, con intervalli di temperatura d'esercizio più estesi rispetto ai fluidi a base minerale. Sono inoltre compatibili con diverse guarnizioni.

Tuttavia, il costo è molto più elevato, sino ad otto volte di quello dell'olio minerale e risultano essere incompatibili con alcuni elastomeri e vernici. Non rappresentano inoltre una soluzione ecologica. [1]

2.4.3 Applicazioni e normative di riferimento

Tali fluidi trovano largo impiego in impianti critici dal punto di vista termico o della sicurezza, come quelli dell'industria siderurgica, aeronautica, delle centrali elettriche o delle fonderie e nei sistemi ad alto rischio di incendio. Particolarmente importanti sono le applicazioni dove è necessaria resistenza al fuoco, per cui vengono adottati fluidi classificati HFDR secondo la norma ISO 6743-4. In generale, la normativa ISO consente una classificazione omogenea a livello internazionale. [1]

2.5 Oli biodegradabili

2.5.1 Composizione e caratteristiche generali

Gli oli biodegradabili sono fluidi idraulici formulati principalmente con basi vegetali o sintetiche progettate per favorire la degradazione naturale nell'ambiente. Sono ottenuti da oli vegetali come l'olio di colza, soia, girasole o da polialcoli e poliesteri sintetici biodegradabili. I fluidi ecologici sintetici si suddividono principalmente in esteri sintetici e poliglicoli e nel complesso presentano caratteristiche prestazionali superiori rispetto agli oli vegetali ma il loro utilizzo è spesso limitato dall'elevato costo. La loro composizione li rende una valida alternativa agli oli minerali tradizionali, soprattutto in applicazioni a rischio di contaminazione ambientale. [1]

2.5.2 Prestazioni e limiti operativi

Gli oli biodegradabili offrono un eccellente bilanciamento tra prestazioni tecniche e ridotto impatto ambientale grazie alla loro tossicità nulla. Presentano una buona stabilità termica, un adeguato potere lubrificante, bassa volatilità, discreto flash point e compressibilità minore degli oli minerali. Hanno una viscosità e un indice di viscosità comparabili a quelli degli oli minerali, e garantiscono una buona protezione contro usura, corrosione e ossidazione. Inoltre sono compatibili con guarnizioni, vernici e materiali elastomerici.

Tuttavia, rispetto agli oli minerali, tendono a presentare una minore stabilità idrolitica e potere antiossidante ridotto, con una vita utile inferiore in condizioni di esercizio estreme o elevate temperature. Inoltre il loro costo può essere più che raddoppiato rispetto ai fluidi minerali tradizionali. Sono generalmente meno infiammabili rispetto agli oli minerali, ma non raggiungono la stessa resistenza al fuoco dei fluidi sintetici specifici. [1]

2.5.3 Applicazioni e normative di riferimento

Questi fluidi sono particolarmente indicati per applicazioni in ambienti sensibili e per il settore mobile, come macchine agricole e movimento terra, dove il rischio di sversamenti in ambienti naturali è più elevato e di conseguenza, in caso di perdite di olio o guasti ai tubi flessibili, gli oli biodegradabili presentano un rischio molto più basso per l'ambiente rispetto ai tradizionali oli minerali. La norma di riferimento per la compatibilità ambientale dei lubrificanti è la ISO 15380:2016, che definisce i requisiti prestazionali e ambientali per i fluidi idraulici considerati ecocompatibili. Questa normativa si applica principalmente ai sistemi idraulici, in particolare ai circuiti di alimentazione, e fornisce indicazioni utili sia ai produttori che agli utilizzatori per la selezione di fluidi sostenibili sotto il profilo ambientale. Secondo questa normativa, gli oli biodegradabili sono classificabili come segue nella Tabella 2.2. [4]

Sigla	Denominazione Estesa	Tipologia
HETG	Hydraulic Oil Enviromental TryGlicerid	Oli di derivazione vegetale
HEPG	Hydraulic Oil Enviromental PolyGlycol	Oli base poliglicole
HEES	Hydraulic Oil Enviromental Ester Synthetic	Oli base esteri sintetici
HEPR	Hydraulic Oil Enviromental Polyalphaolefine and Related Products	Oli base polialfaolefine e idrocarburi simili

Tabella 2.2 Normativa oli biodegradabili

2.6 Riepilogo e confronto tra i diversi fluidi

In conclusione, nonostante i notevoli sviluppi nel campo dei fluidi alternativi, l'olio minerale continua a rappresentare, ad oggi, la scelta più equilibrata tra prestazioni tecniche, costo e disponibilità. Tuttavia, alla luce delle crescenti esigenze ambientali e della spinta verso soluzioni

più sostenibili e meno nocive per la salute, i fluidi biodegradabili, pur richiedendo ancora alcuni miglioramenti, potrebbero affermarsi come i principali candidati per il futuro dell'oleoidraulica.

È importante sottolineare che la gran parte dei componenti attualmente in commercio è progettata e testata per funzionare con olio minerale. Per questo motivo, in caso di sostituzione con fluidi sintetici, acquosi o biodegradabili, sia su impianti esistenti sia in fase di progettazione, è fondamentale verificare preventivamente con i produttori la compatibilità dei materiali e delle guarnizioni.

Al di fuori di contesti specifici, come quelli alimentari o farmaceutici che impongono l'uso di fluidi a base d'acqua, oppure ambienti ad alto rischio d'incendio, l'olio minerale rimane la scelta preferenziale grazie all'ottimo compromesso tra prestazioni e costo.

Infine, si ricorda che le prestazioni di un fluido non dipendono solo dalla sua formulazione chimica, ma anche dalla sua purezza durante l'esercizio. Per questo motivo, è essenziale affiancare allo studio delle caratteristiche dei fluidi anche l'analisi dei fenomeni di contaminazione e dei sistemi di filtrazione, aspetti che verranno trattati nei capitoli successivi.

3 Contaminazione dei fluidi

Nei sistemi oleoidraulici, il fluido viene contaminato da particelle di diverso tipo che possono entrare nel circuito in diversi momenti della produzione o quando la macchina è ferma. Queste impurità, spesso introdotte involontariamente o a causa di negligenza nella manutenzione, rappresentano una delle principali cause di degrado degli impianti.

La contaminazione compromette le caratteristiche chimico-fisiche del fluido, favorisce processi corrosivi e abrasivi, e può portare a una progressiva perdita di efficienza, fino al malfunzionamento completo del sistema. Studi e prove sperimentali dimostrano che circa il 70% dei guasti negli impianti oleoidraulici è imputabile all'inquinamento del fluido. Anche se un impianto è stato progettato correttamente, con componenti di qualità e con un fluido dotato di additivi adatti, l'assenza o l'insufficienza di un sistema di filtrazione e controllo della contaminazione può ridurre la durata della macchina.

Diventa quindi essenziale adottare strategie preventive e tecniche di filtrazione per limitare la presenza di impurità entro livelli compatibili con la tolleranza dei componenti.

In questo capitolo verranno analizzate le principali cause della contaminazione, le tipologie di sostanze estranee che possono compromettere il fluido e le sue proprietà, nonché le modalità per rilevare, prevenire e contrastare questo fenomeno, attraverso strumenti di misura specifici e pratiche di manutenzione mirate. [1]

3.1 Tipologie di contaminazione

Le tipologie di contaminazione si distinguono in base alla loro natura fisica in tre tipi: particelle solide, gassose e liquide. Ognuna di queste può causare diversi problemi e conseguenze sul funzionamento dell'impianto.

3.1.1 Contaminazione solida

I contaminanti solidi rappresentano la forma di inquinamento più frequente e più dannosa. Queste particelle provengono da diverse origini e sono spesso presenti fin dalle fasi iniziali di utilizzo dell'impianto, oppure si accumulano progressivamente per usura durante il funzionamento. Sono costituite principalmente da piccoli trucioli di metallo, sabbia, polveri e fibre di vario tipo. In figura 3.1 è mostrato un esempio di contaminazione solida.



Figura 3.1 Contaminazione solida

Per capire ancora meglio la natura delle particelle solide, queste vengono classificate in base alla loro durezza. Possiamo distinguere tre categorie: particelle estremamente dure, dure e morbide. Le prime includono materiali tra cui corindone, scorie metalliche e ruggine; le seconde comprendono metalli tipo ferro, acciaio, ottone, bronzo e alluminio. Entrambi i gruppi rappresentano un pericolo potenziale per l'integrità del sistema se non vengono prontamente filtrati. Le particelle morbide, invece, sono costituite principalmente da fibre tessili, residui di tenute in gomma, materiali di sigillatura e dai cosiddetti *varnish*, ossia depositi resinosi che derivano dall'invecchiamento e dall'ossidazione del fluido. Sebbene meno aggressive in termini di durezza, anche queste impurità possono causare problemi significativi, soprattutto nei componenti più delicati.

In generale, queste particelle abrasive, spesso troppo piccole per essere viste a occhio nudo, si muovono all'interno del sistema danneggiando i componenti e accelerando il loro deterioramento.

Un altro aspetto critico da considerare riguarda la quantità e la dimensione delle particelle. Non è solo la composizione a determinare il livello di contaminazione, ma anche la concentrazione e la presenza di contaminanti molto fini. Infatti, la pericolosità delle particelle solide aumenta all'aumentare della loro finezza: più sono piccole, maggiore è la capacità di infiltrarsi nei punti più delicati del sistema. In particolare, quelle con dimensioni inferiori ai $5 \mu m$ riescono a superare anche le tolleranze più ristrette dei componenti di precisione. Questo rappresenta un rischio concreto soprattutto per elementi sensibili come valvole di regolazione, pompe e servocomandi, che possono subire alterazioni significative nel funzionamento anche a causa di una minima presenza di impurità solide.

È quindi importante prestare attenzione a queste particelle per garantire il funzionamento del sistema. [1] [5]

3.1.2 Contaminazione liquida

La contaminazione liquida nei sistemi oleoidraulici si riferisce alla presenza indesiderata di altri fluidi all'interno dell'olio idraulico, che ne alterano le caratteristiche fisico-chimiche e compromettono il corretto funzionamento, la stabilità e l'affidabilità del circuito.

Tra i liquidi contaminanti, il più comune è sicuramente l'acqua, raffigurata in figura 3.2, che può trovarsi nel sistema in due modalità: emulsionata (ossia finemente dispersa nel fluido), oppure in

forma libera, visibile come separazione netta, a seconda della quantità presente e della temperatura di esercizio.



Figura 3.2 Contaminazione liquida

La sua presenza dipende in genere dalla temperatura e dal livello di saturazione del fluido. Questo comportamento è ben illustrato nel grafico seguente, figura 3.3, che mostra come la temperatura influenzi la capacità del fluido idraulico di trattenere acqua in forma disciolta. Quando la temperatura scende o la quantità di acqua supera la soglia di saturazione, essa si separa diventando "libera", e dunque più dannosa per il sistema. [6]

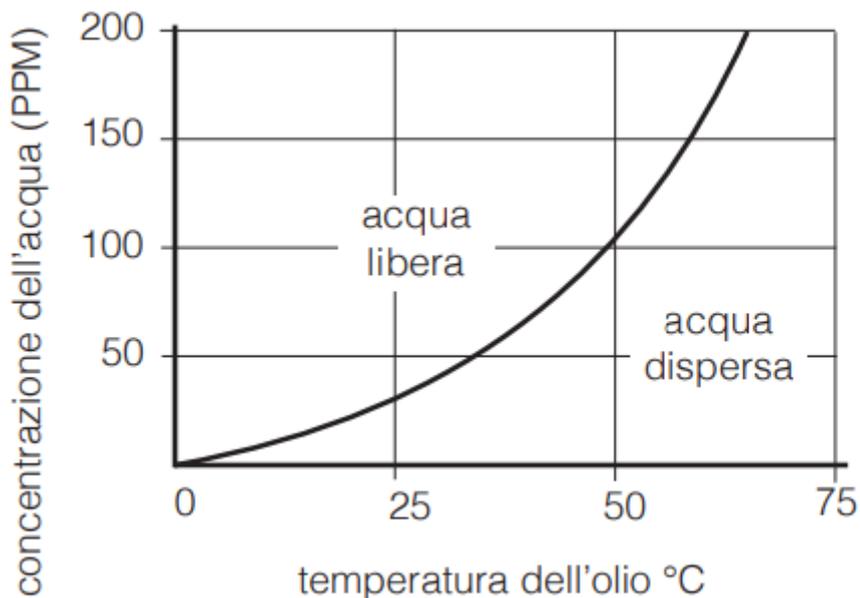


Figura 3.3 Concentrazione dell' acqua in funzione della temperatura dell' olio

Altri tipi di contaminanti liquidi sono combustibili, solventi o oli incompatibili che possono finire per errore nel sistema. Anche l'umidità ambientale rappresenta un problema frequente, poiché può

condensarsi e miscelarsi al fluido, specialmente quando ci sono sbalzi termici o l'ambiente è molto umido. Questi elementi alterano la composizione originaria del fluido, rendendolo meno adatto a svolgere le sue funzioni primarie.

In generale, la contaminazione liquida è più difficile da individuare rispetto a quella solida soprattutto quando avviene in forma dispersa o a basse concentrazioni, poiché meno visibile e quindi spesso trascurata, ma può causare danni altrettanto gravi se non la si rileva e tratta in tempo. Bisogna quindi prevenire l'ingresso di queste particelle prestando attenzione alla progettazione e manutenzione dell'impianto e alla scelta dei fluidi da utilizzare. [1] [5]

3.1.3 Contaminazione gassosa

Oltre ai contaminanti solidi e liquidi, un'altra forma di impurità che può compromettere l'efficienza di un fluido idraulico è la presenza di gas, in particolare di aria. La contaminazione gassosa si verifica quando nel fluido sono presenti bolle d'aria o gas disciolti, che alterano la continuità e la stabilità del sistema idraulico.

L'aria può presentarsi nel fluido in due forme principali: disciolta oppure libera. Nella forma disciolta, l'aria è distribuita in modo omogeneo all'interno del fluido e non è immediatamente visibile. Quando però le condizioni operative, come la pressione o la temperatura, cambiano in modo repentino, l'aria può separarsi e formare bolle o schiuma, compromettendo la regolarità del flusso. L'aria libera, invece, è costituita da vere e proprie sacche o bolle presenti all'interno del circuito, facilmente individuabili in certi casi e comporta delle problematiche maggiori rispetto a quelle dell'aria disciolta. Nella figura 3.4 è possibile osservare un esempio di contaminazione gassosa.



Figura 3.4 Contaminazione gassosa

Questa forma di contaminazione è meno percepita rispetto a quella solida o liquida ma influisce comunque negativamente sul funzionamento dell'impianto. È quindi fondamentale tenerla sotto controllo. [1] [5]

3.2 Origini della contaminazione

La contaminazione del fluido idraulico può avere diverse origini che è importante conoscere per poterle prevenire e controllare con le giuste strategie.

Una prima distinzione che è utile fare è quella tra contaminazione iniziale e contaminazione progressiva. Con contaminazione iniziale si intendono tutte le impurità presenti nel fluido nelle prime fasi di installazione e avviamento, come per esempio i contaminanti che sono già presenti nel fluido al momento del riempimento, oppure i residui che derivano da lavorazioni meccaniche, saldature o da una mancata pulizia dei componenti. Anche il serbatoio, le tubazioni o i cilindri nuovi possono contenere polveri, trucioli metallici o altri frammenti accumulati durante la produzione o dallo stoccaggio.

La contaminazione progressiva, invece, si accumula nel tempo. Può generarsi per usura e degradazione dei componenti, per reazioni chimiche o a causa di eventi esterni come l'ingresso di agenti contaminanti dall'ambiente circostante. Anche operazioni di manutenzione svolte con poca attenzione o non adeguatamente protette possono aumentare la quantità di impurità nel circuito.

Le fonti di contaminazione, quindi, non derivano solo fluido stesso, ma anche dall'intero impianto, da come viene utilizzato e dalle condizioni ambientali. Ecco perché è importante mantenere l'impianto completamente pulito sin dall'inizio e continuare a controllarlo durante il suo funzionamento. Solo attraverso una corretta prevenzione e una manutenzione attenta è possibile garantire prestazioni durature ed evitare i danni legati all'inquinamento del fluido. [1] [7]

3.2.1 Origine della contaminazione solida

La contaminazione solida è tra le più diffuse e pericolose nei sistemi oleoidraulici. Le particelle che inquinano il fluido possono avere origine sia interna sia esterna al circuito, e spesso sono presenti già nelle primissime fasi di vita del sistema. Altre si accumulano nel tempo, come conseguenza del funzionamento o delle operazioni di manutenzione.

Una fonte primaria è rappresentata dalla fase di fabbricazione e assemblaggio dei componenti. Nonostante i costruttori adottino elevati standard di pulizia, può capitare che alcune parti contengano ancora minuscoli residui derivanti dalle lavorazioni meccaniche. Si tratta, ad esempio, di trucioli metallici, scorie di saldatura, sabbia di fusione o frammenti di ghisa, alluminio, acciaio, gomma e fibre di tessuto (come quelli rilasciati da stracci usati per la pulizia). Durante lo stoccaggio, inoltre, l'olio protettivo applicato per prevenire la corrosione può attirare e trattenere particelle di polvere, che finiscono per annidarsi all'interno dei componenti.

Durante il funzionamento della macchina, altre particelle solide si generano dall'attrito fra le superfici mobili. Questi corpuscoli possono provenire dall'usura delle superfici metalliche o dal degrado dei materiali di tenuta, come guarnizioni e O-ring. Gli elementi che mettono in comunicazione il sistema con l'ambiente esterno, come steli dei cilindri, alberi motore, aste di comando delle valvole, possono introdurre sporco e polveri, anche in presenza di anelli raschiatori, che non sempre riescono a bloccare efficacemente le impurità. Un ruolo critico è svolto anche dagli sfiati del serbatoio poiché se non sono protetti da filtri adeguati permettono facilmente l'ingresso di polveri ambientali.

Infine, un'altra causa rilevante è rappresentata dalle attività di manutenzione, per esempio da operazioni come la sostituzione o il rabbocco dell'olio, lo smontaggio e rimontaggio dei

componenti o il travaso del fluido da contenitori non perfettamente puliti. Anche l'uso di utensili contaminati o ambienti di lavoro non adeguatamente puliti rappresenta un rischio per l'integrità del sistema.

Dunque è fondamentale una gestione attenta e utilizzare buone pratiche operative per minimizzare l'introduzione di impurità. [1] [8]

3.2.2 Origine della contaminazione liquida

La forma più comune di contaminante liquido è l'acqua, che può penetrare nel circuito per diverse cause e in diversi modi.

Una causa principale è l'umidità dell'ambiente, che può entrare nel serbatoio e trasformarsi in goccioline d'acqua quando il sistema è spento o soggetto a sbalzi termici. In questi casi, infatti, il vapore acqueo contenuto nell'aria può condensare trasformandosi in acqua liquida e depositarsi nel fluido. Questo fenomeno accade spesso nei sistemi che operano in ambienti esterni o non climatizzati.

L'acqua può inoltre entrare nel circuito durante le operazioni di riempimento o rabbocco dell'olio, soprattutto se questi interventi non vengono eseguiti in condizioni controllate o se l'olio nuovo è stato conservato in contenitori non ermetici o contaminati. Anche utensili e attrezzature non perfettamente asciutti possono essere una via d'accesso per liquidi estranei.

Un'ulteriore fonte di contaminazione è rappresentata dalla scarsa tenuta dei coperchi o dei punti di ventilazione, che consente l'ingresso diretto di acqua piovana, condensa o altri liquidi. In alcuni casi, possono riscontrarsi anche tracce di fluidi non compatibili, come carburanti, solventi o detersivi, accidentalmente introdotti durante attività di manutenzione o lavaggio.

Risulta dunque fondamentale monitorare con attenzione la qualità del fluido, soprattutto nei sistemi soggetti a condizioni ambientali variabili o ad alta umidità. [1] [8]

3.2.3 Origine della contaminazione gassosa

La presenza di contaminanti gassosi è spesso legata a fenomeni fisici ben noti, come la tensione di vapore e la solubilità dei gas nei fluidi, già descritti nel Capitolo 1. In condizioni normali, ogni litro di fluido idraulico può contenere una certa quantità di aria disciolta: ad esempio, un litro di olio minerale può racchiudere circa 80 cm³ di aria, pari all'8–10% del volume. Questa quantità può variare a seconda della composizione del fluido: le emulsioni acqua-glicole contengono solitamente il 3–4% di aria, quelle acqua-olio il 5–6%, mentre nei fluidi sintetici il contenuto può raggiungere anche il 7–9%.

Il problema sorge quando, per vari motivi, ulteriore aria entra nel circuito o quando il gas disciolto si libera in forma di microbolle. Questa condizione si verifica frequentemente quando si aspirano fluidi dal serbatoio che non sono stati sufficientemente degassati, oppure a causa di progettazioni non corrette, come tubazioni di scarico che non si trovano al di sotto del livello minimo del fluido. Anche l'immersione di componenti nel fluido o il ritorno dell'olio al serbatoio a velocità elevate può favorire l'ingresso di aria nel sistema.

Un'altra causa che determina la presenza di aria può essere la miscelazione turbolenta tra fluido e gas che si manifesta con la formazione di schiuma. Questa schiuma tende a ricircolare all'interno del circuito, riducendo le prestazioni. Prima di intervenire con soluzioni più complesse, conviene

verificare che tutte le linee di scarico, tranne i drenaggi, siano posizionate sotto il livello minimo del fluido, evitando così l'aspirazione d'aria.

È importante quindi prevenire l'ingresso di contaminazione gassosa con un'attenta gestione dell'impianto, sia nella fase di progettazione che durante l'esercizio. [1] [8]

3.3 Effetti della contaminazione

La contaminazione all'interno di un sistema oleidraulico può influenzare negativamente le prestazioni, l'affidabilità e la durata dell'impianto. Anche se ogni tipo di contaminante (solido, liquido o gassoso) agisce in maniera diversa, l'impatto complessivo è sempre negativo, causando una perdita di efficienza o il danneggiamento permanente dei componenti.

In questo paragrafo si analizzano separatamente gli effetti legati a ciascuna tipologia di contaminazione, evidenziando le problematiche che ne derivano. Infine, verrà fornita una panoramica complessiva sugli effetti globali che la contaminazione può avere sull'intero sistema.

3.3.1 Effetti della contaminazione solida

Tra le conseguenze più comuni dei contaminanti solidi si evidenziano:

- Micropitting o usura da fatica superficiale: le particelle solide si infilano tra le superfici in movimento e creano micro-fratture superficiali. Se queste piccole fratture sono sottoposte a sollecitazioni continue possono diventare sempre più grandi, portando a danni più estesi e guasti.
- Effetto sabbatura: le particelle più piccole scorrono sulle superfici e lungo i bordi di controllo, depositandosi e causando la rottura o il deterioramento di altri componenti.
- Abrasioni: le particelle abrasive graffiano e scalfiscono le superfici metalliche rendendole irregolari e gli elastomeri, asportandone materiale e danneggiandone la struttura. Nella figura 3.5 si può osservare un esempio di abrasione fra due superfici in movimento.

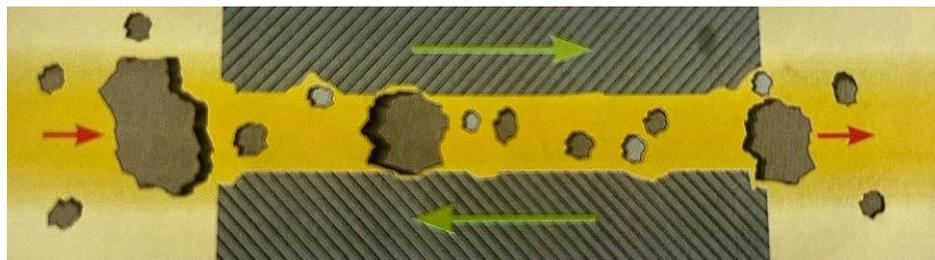


Figura 3.5 Abrasione fra due superfici in movimento

Per esempio in una pompa a palette, come raffigurato in figura 3.6, la zona più sensibile è quella in cui si ha lo scorrimento tra palette e statore che viene graffiata dal contaminante.

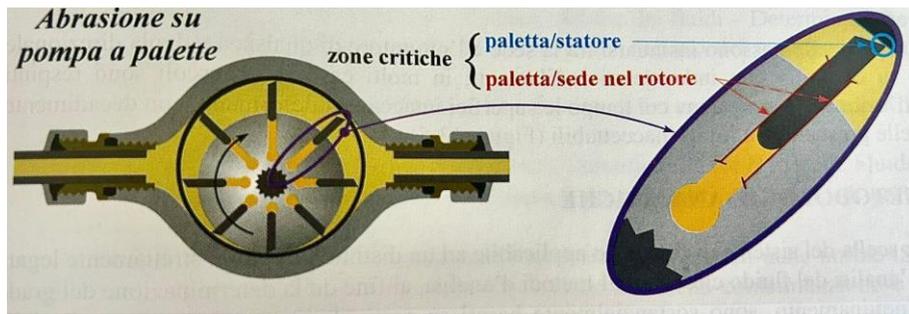


Figura 3.6 Abrasione su pompa a palette

- Invecchiamento precoce del fluido: un elevato contenuto di particelle solide contribuisce al degrado delle proprietà chimico-fisiche dell'olio, riducendone la capacità lubrificante e alterandone la viscosità, accelerando così il deterioramento del fluido.
- Corrosione e formazione di ruggine: tra i contaminanti solidi possono esserci particelle di ruggine o ossidi che favoriscono la corrosione sulle superfici metalliche. Questi fenomeni possono causare diversi danni.
- Compromissione della tenuta tra le parti: l'abrasione e la corrosione deteriorano le superfici metalliche e gli elementi di tenuta in elastomero, provocando perdite di fluido e riducendo l'efficacia del sistema.

Questi fenomeni accelerano il deterioramento delle parti meccaniche e riducono la vita utile dell'impianto, rendendo indispensabile un monitoraggio continuo e un'efficace strategia di filtrazione per mantenere sotto controllo la contaminazione solida. [1] [5]

3.3.2 Effetti della contaminazione liquida

I principali effetti che derivano dalla presenza di contaminanti liquidi negativi includono:

- Invecchiamento precoce del fluido: la presenza di acqua favorisce l'ossidazione dell'olio, accelerando i processi di degrado chimico. Questo porta alla formazione di prodotti secondari come resine, lacche, fanghi e varnish, che si depositano nei componenti del sistema danneggiando il funzionamento.
- Riduzione della viscosità e della capacità lubrificante: l'acqua abbassa la viscosità dell'olio e ne diminuisce l'efficacia lubrificante, aumentando l'attrito tra le superfici in movimento e favorendo l'usura meccanica.
- Formazione di schiuma: l'alterazione delle proprietà di separazione aria/olio causata dall'acqua facilita la formazione di schiuma, che riduce l'efficienza del sistema e ostacola la trasmissione della potenza.
- Proliferazione microbica: la presenza d'acqua favorisce la crescita di microrganismi (batteri, funghi, lieviti), che generano biofango e sostanze corrosive. Questo può ostruire i filtri e causare danni al sistema, come nel caso noto della "Peste del Diesel".
- Alterazione delle proprietà chimico-fisiche del fluido: l'ingresso accidentale di liquidi estranei (come carburanti, solventi o altri oli incompatibili) compromette la stabilità e le prestazioni dell'olio idraulico, riducendone l'affidabilità e la durata nel tempo.

Per questi motivi, anche piccole quantità di contaminazione liquida possono compromettere l'affidabilità e la durata del sistema oleoidraulico, rendendo fondamentale un controllo attento e continuo del fluido operativo. [1] [5]

3.3.3 Effetti della contaminazione gassosa

Tra i principali effetti della contaminazione gassosa si possono evidenziare:

- Comprimibilità del fluido: l'aria libera o in forma di microbolle rende il fluido comprimibile, alterando la trasmissione dell'energia e generando ritardi nella risposta degli attuatori, vibrazioni o movimenti irregolari, soprattutto nei circuiti di precisione.
- Riduzione della capacità lubrificante: l'aria diminuisce il potere lubrificante del fluido, poiché è più difficile formare il film oleoso tra le superfici in movimento. Questo fenomeno incrementa l'usura per attrito e il rischio di danni ai componenti.
- Efficienza termica compromessa: la presenza di gas nel fluido peggiora la capacità di trasferimento del calore, limitando l'effetto refrigerante del fluido idraulico e favorendo l'aumento delle temperature di esercizio.
- Formazione di schiuma: quando l'aria non viene efficacemente separata o degassata, tende ad accumularsi sotto forma di schiuma nel serbatoio. Questo fenomeno può causare ulteriori ingressi d'aria nel circuito, con un effetto a catena di deterioramento del sistema.
- Effetto diesel: è uno dei fenomeni più gravi. Si verifica quando le microbolle d'aria vengono sottoposte ad alte pressioni, per esempio all'interno della pompa, generando un riscaldamento locale simile alla combustione spontanea nel motore diesel. Questo può generare micro-esplosioni che danneggiano le superfici metalliche interne, causando pitting e cricche da fatica.
- Cavitazione: anche la presenza di gas disciolti o bolle può contribuire alla cavitazione, un fenomeno distruttivo che porta alla formazione e il collasso di vuoti nel fluido. Questo fenomeno danneggia in particolare le pompe, come in figura 3.7, e i componenti soggetti a variazioni rapide di pressione.



Figura 3.7 Effetto della cavitazione in una pompa

In sintesi, l'inclusione d'aria o gas nel fluido oleoidraulico danneggia in modo significativo l'efficienza, la precisione e l'integrità dell'impianto. [1] [5]

3.3.4 Effetti globali della contaminazione

Al di là degli effetti specifici legati alla natura del contaminante (solido, liquido o gassoso), è importante evidenziare come la contaminazione incida negativamente sull'intero funzionamento e sull'affidabilità dei sistemi oleoidraulici. In sintesi, gli effetti più rilevanti si manifestano in:

- Trasmissione dell'energia: l'efficienza si riduce a causa della presenza di aria o acqua, che altera la comprimibilità del fluido;

- Lubrificazione: l'efficacia lubrificante diminuisce per effetto di abrasioni, degradazioni superficiali o alterazioni della viscosità;
- Tenuta tra le parti: si verificano danneggiamenti delle superfici metalliche e degli elastomeri, con conseguenti perdite e trafileamenti;
- Durata del fluido: si ha un decadimento delle proprietà chimico-fisiche, con conseguente invecchiamento accelerato e necessità di sostituzioni più frequenti;
- Affidabilità complessiva del sistema: si osserva un aumento dei guasti, una riduzione della vita utile dei componenti e una maggiore necessità di interventi manutentivi.

Diversi studi europei e nordamericani hanno messo in evidenza che molti guasti nei circuiti oleodinamici dipendono da un controllo poco efficace della contaminazione. Questo concetto è schematizzato nel seguente diagramma a blocchi della figura 3.8. [1]

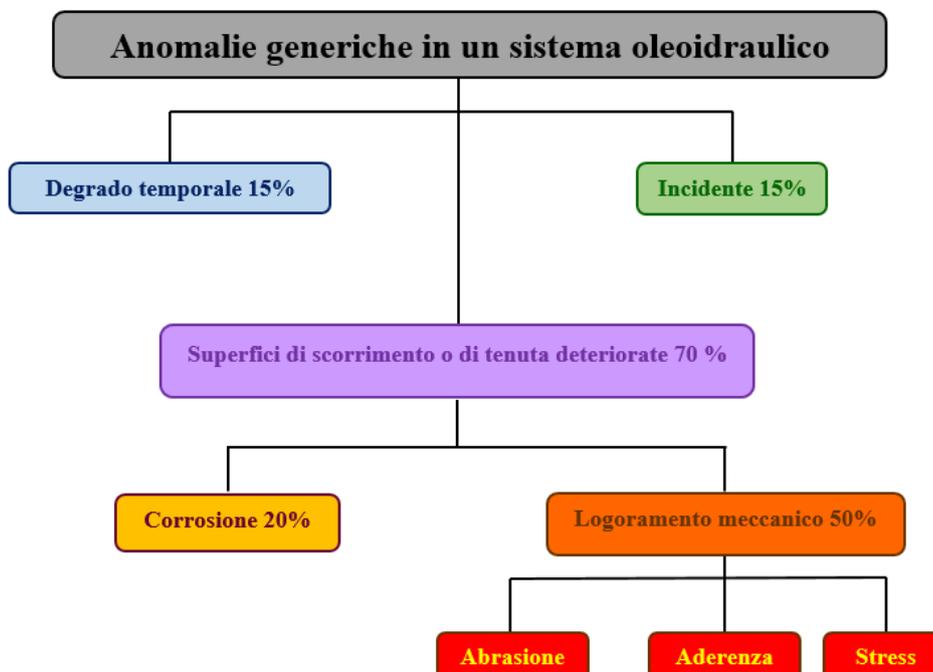


Figura 3.8 Diagramma a blocchi per anomalie in un sistema oleidraulico

3.3.5 Effetto degli additivi come potenziali contaminanti

Sebbene gli additivi siano introdotti intenzionalmente nei fluidi oleidraulici per migliorarne le prestazioni, in determinate condizioni essi possono diventare essi stessi una fonte di contaminazione.

Questo può avvenire, ad esempio, quando:

- Gli additivi precipitano dal fluido a causa di variazioni di temperatura, invecchiamento del fluido o reazioni chimiche con altri contaminanti;
- Interazioni tra additivi incompatibili, in caso di miscelazione di fluidi diversi, possono portare alla formazione di composti insolubili;

- Alcuni additivi solidi, come quelli contenenti metalli (zinco, bario, magnesio, calcio, fosforo, zolfo o cloro), possono dare origine a particelle che si comportano come veri e propri contaminanti solidi.

Inoltre, in ambienti particolari come quelli esposti a radiazioni o forti sollecitazioni termiche, possono verificarsi reazioni di degradazione degli additivi stessi, con formazione di residui o effetti dannosi su guarnizioni e materiali elastomerici, che a loro volta rilasciano ulteriori frammenti contaminanti nel fluido.

È quindi fondamentale considerare non solo la presenza e la tipologia degli additivi, ma anche la loro compatibilità con l'intero sistema e la loro stabilità nel tempo, al fine di evitare che la loro funzione correttiva si trasformi in una causa di degrado. [1]

3.4 Metodi e strumenti per la misura della contaminazione

Poiché i contaminanti possono essere di natura diversa, solidi, liquidi o gassosi, è necessario adottare metodi di misura specifici e strumenti adeguati per ciascuna tipologia.

Nei paragrafi successivi vengono descritti i principali parametri da monitorare, le norme di riferimento e le tecniche più diffuse per il rilevamento e l'analisi della contaminazione, fornendo così un quadro completo degli strumenti a disposizione per il controllo e la manutenzione preventiva dei circuiti oleodinamici.

3.4.1 Rilevamento della contaminazione solida

Per valutare con precisione il livello di contaminazione solida, i parametri principali utilizzati sono:

- Numero totale di particelle per unità di volume, che indica quante particelle sono presenti in un determinato volume di fluido (es. particelle/ml).
- Dimensione delle particelle, spesso divisa in intervalli specifici (ad esempio $>4 \mu\text{m}$, $>6 \mu\text{m}$, $>14 \mu\text{m}$), essenziale per comprendere la gravità e il possibile impatto delle particelle stesse. Le dimensioni possono essere espresse anche in pollici o in unità mesh, che rappresentano il numero di aperture per pollice di un setaccio utilizzato per la classificazione.
- Distribuzione dimensionale, che permette di analizzare l'origine e la natura della contaminazione sulla base delle diverse dimensioni delle particelle rilevate.

Per garantire una valutazione standardizzata e comparabile dei livelli di contaminazione, si fa riferimento a diverse normative riconosciute a livello internazionale. Le principali classificazioni standard per la contaminazione particellare includono:

- ISO 4406:1999, che stabilisce un metodo di codificazione del livello di contaminazione da particelle solide nei fluidi. Secondo tale normativa la valutazione della quantità di particelle presenti nei fluidi veniva effettuata considerando la dimensione massima rilevata per ciascuna particella, suddivisa in tre intervalli dimensionali: superiori a 2 mm , a 5 mm e a 15 mm . Questo approccio, tuttavia, è stato superato da metodi più precisi e standardizzati. Le particelle vengono ora rilevate mediante contatori automatici (calibrati secondo la ISO 11171:1999), e la classificazione si basa sul numero di particelle con dimensioni superiori

rispettivamente a $4 \mu\text{m}(c)$, $6 \mu\text{m}(c)$ e $14 \mu\text{m}(c)$. Questo approccio consente una valutazione più affidabile del livello di contaminazione del fluido.

- NAS 1638, un sistema utilizzato in ambito aeronautico e industriale. Classifica la contaminazione del fluido suddividendo le particelle in fasce dimensionali predefinite. Le cinque categorie previste sono: $5-15 \mu\text{m}$, $15-25 \mu\text{m}$, $25-50 \mu\text{m}$, $50-100 \mu\text{m}$ e oltre $100 \mu\text{m}$. Per ogni fascia, si conta il numero di particelle presenti in 100 ml di fluido. I valori così ottenuti vengono poi confrontati con una tabella standard per determinare il livello di contaminazione complessivo del campione.
- SAE AS4059, evoluzione della NAS 1638, che offre una scala più ampia e aggiornata per la classificazione delle particelle. Analogamente agli standard ISO 4406 e NAS 1638, anche la norma SAE AS 4059 fornisce un sistema di classificazione dei fluidi idraulici basato sulla concentrazione di particelle solide presenti. Le modalità di analisi utilizzate sono simili a quelle previste dalle altre normative, impiegando tecniche di conteggio delle particelle in sospensione all'interno del fluido. La classificazione prevista dalla SAE AS 4059 considera sia la dimensione delle particelle che la loro quantità, includendo anche una suddivisione per intervalli dimensionali. Poiché i risultati del conteggio possono variare in base alla tecnologia di misura e alla calibrazione dello strumento utilizzato, le dimensioni vengono indicate mediante lettere identificative (da A a F), associate a specifici range. La norma prende in considerazione sei soglie dimensionali di particelle, ovvero: $>4 \mu\text{m}(c)$, $>6 \mu\text{m}(c)$, $>14 \mu\text{m}(c)$, $>21 \mu\text{m}(c)$, $>38 \mu\text{m}(c)$ e $>70 \mu\text{m}(c)$. Per ciascuna di queste soglie viene determinato il numero di particelle per unità di volume, e sulla base di tali dati si assegna una classe di purezza. La classificazione ottenuta si esprime generalmente attraverso tre criteri principali:
 1. il numero di particelle superiori a una certa dimensione;
 2. l'assegnazione di una classe di purezza per ciascun intervallo dimensionale;
 3. la specifica della classe massima rilevata tra tutte quelle misurate.
- ISO 4407:2002 che effettua un conteggio delle particelle solide tramite analisi al microscopio ottico.

Per rilevare e quantificare la contaminazione solida, si possono impiegare diverse tecniche e strumenti con caratteristiche e applicazioni specifiche.

Gli strumenti e le tecniche più comuni sono:

- Contatore di particelle automatico: è lo strumento più diffuso. È composto principalmente da due elementi: un sensore ottico che ha il compito di misurare il numero e la grandezza delle particelle e un contatore che elabora e comunica tramite display o stampa i segnali rilevati. A questo viene collegato il campionatore che permette di rilevare la classe di contaminazione. Tra i modelli più utilizzati si segnalano il Pall PCM500, che verrà successivamente analizzato in dettaglio nel paragrafo 5.5, e l'HYDAC FCU.
- Analisi microscopica: questo metodo prevede la filtrazione del fluido su una membrana che verrà osservata al microscopio ottico o a scansione elettronica (SEM). Nel microscopio ottico, osservabile in figura 3.9, un campione di fluido viene prelevato da un punto specifico e fatto passare attraverso una membrana con porosità controllata che verrà confrontata con membrane di riferimento al fine di determinare la classe di contaminazione. Il microscopio a scansione elettronica permette anche di individuare componenti chimici indesiderati.



Figura 3.9 Microscopio ottico

- Metodi gravimetrici: consistono nel prelevare un liquido tra due membrane di peso predeterminato e farlo scorrere. Una volta effettuato il filtraggio, la differenza tra peso lordo e tara fornisce come risultato il numero di particelle contenuto nel campione di fluido.
- Analisi spettrografica: consiste nel confrontare un campione di fluido con quello prelevato dalla macchina: utilizzando uno spettrometro a raggi infrarossi, si confrontano i due spettri per identificare la presenza di contaminanti solidi e chimici.

È dunque fondamentale eseguire una valutazione corretta della contaminazione solida, tramite gli strumenti adeguati, al fine di garantire l'affidabilità, la durata e l'efficienza dei sistemi oleoidraulici. [1] [9]

3.4.2 Rilevamento della contaminazione liquida

Per valutare la contaminazione liquida si considerano principalmente i seguenti parametri:

- Contenuto di acqua libera e disciolta, che può essere misurato in percentuale o in parti per milione (ppm).
- Indice di acidità (TAN - Total Acid Number) e indice di basicità (TBN - Total Base Number). Il primo misura la presenza di sostanze acide, il secondo invece fornisce un'indicazione della quantità di sostanze basiche utilizzate per evitare l'accumulo di acidi e contrastare la corrosione. Gli oli freschi e non utilizzati hanno un indice di acidità basso, ma un indice di basicità alto. Durante la vita utile dell'olio, il primo aumenta mentre il secondo diminuisce. [10] [11]
- Presenza di solventi o altri fluidi estranei, che possono alterare le caratteristiche originali del fluido idraulico.

Anche in questo caso, le metodologie di misura sono normate da standard internazionali per rendere i dati confrontabili e uniformi. La normativa più importante per la contaminazione liquida è la ASTM D6304 che misura il contenuto di acqua disciolta nei prodotti petroliferi, negli oli lubrificanti e nei fluidi. Questa normativa utilizza la titolazione Karl Fischer col metodo coulometrico e potenziometrico. [12]

Il metodo si basa su una reazione redox in cui l'acqua reagisce con iodio (I_2) e anidride solforosa (SO_2) in presenza di un alcol, di solito metanolo, formando acido solforico e ioduro di idrogeno. Questa reazione permette di calcolare il contenuto di acqua presente nel campione misurando la quantità di iodio consumato.

Esistono due principali modalità operative:

- Titolazione volumetrica che utilizza una soluzione di iodio di concentrazione nota come titolante.
- Titolazione coulometrica in cui lo iodio viene generato elettrochimicamente durante la titolazione. Questo metodo risulta adatto per campioni con contenuti di acqua molto bassi (fino a 1 ppm).

È importante dunque monitorare anche la contaminazione liquida per garantire l'affidabilità del sistema oleodinamico. [13] [14]

3.4.3 Rilevamento della contaminazione gassosa

I principali parametri considerati per valutare la contaminazione gassosa sono:

- Quantità di gas disciolto: si misura la quantità di gas, aria o altri gas atmosferici, disciolto nel fluido idraulico.
- Tipo di gas contaminante: si identifica il tipo di gas presente per capire l'origine della contaminazione e adottare le misure di controllo più appropriate.

Per valutare la contaminazione gassosa si utilizza la normativa ASTM D3427, che determina la capacità di un olio per turbine, ingranaggi o sistemi idraulici di rilasciare l'aria intrappolata. [15]

Tra gli strumenti impiegati maggiormente per il rilevamento della contaminazione gassosa si possono citare gli analizzatori di gas disciolti (DGA - Dissolved Gas Analyzers): sono usati per monitorare lo stato di trasformatori e altre apparecchiature elettriche riempite di olio isolante, rilevando gas tra cui idrogeno, monossido di carbonio, metano, etilene e acetilene che indicano potenziali guasti come rottura dell'isolamento, archi elettrici o surriscaldamento. I DGA permettono di identificare diversi problemi col fine di prevenire guasti prima che diventino molto gravi, ottimizzare la manutenzione e prolungare la vita delle apparecchiature. Un esempio di questa apparecchiatura è mostrato in figura 3.10. La tecnica è efficiente, veloce e richiede poco campione; viene dunque utilizzata in diversi settori tra cui petrolchimico, medico, ambientale e alimentare.



Figura 3.10 Esempio di DGA

È quindi importante monitorare la contaminazione gassosa per prevenire malfunzionamenti e danni agli impianti idraulici per garantire sicurezza e durata del sistema. [16]

4. Filtrazione

La filtrazione è una procedura di laboratorio impiegata sia per separare le impurità solide da liquidi o soluzioni, sia per isolare un composto formato come precipitato o che è cristallizzato all'interno di una soluzione. Nelle successive sezioni verranno descritte le diverse tecniche di filtrazione, nonché le caratteristiche fondamentali e le modalità di utilizzo dei filtri.

4.1 Dispositivo di filtrazione

Il dispositivo di filtrazione viene diviso in tre parti fondamentali:

- Filtro che viene spesso confuso con l'elemento filtrante, ma in realtà rappresenta l'insieme di elementi interni, esterni e accessori. È posizionato in prossimità della macchina
- Corpo del filtro o carcassa, la struttura esterna che contiene tutti i componenti. Presenta anche le bocche per collegarsi ai tubi
- Elemento filtrante, che ha il compito di effettuare la vera e propria operazione di filtrazione dei contaminanti e verrà analizzato in dettaglio nella sezione successiva.

Nella figura 4.1 è possibile osservare il simbolo impiegato per indicare un filtro. [1]

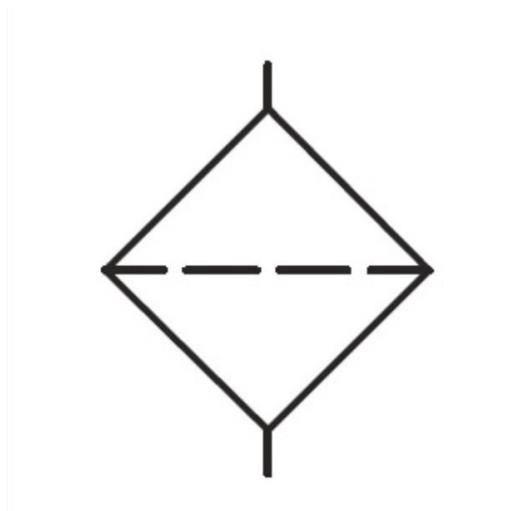


Figura 4.1 Simbolo generico di un filtro

4.1.1 Elemento filtrante

L'elemento filtrante è la parte centrale del filtro e svolge un ruolo fondamentale perché ha il compito di trattenere i contaminanti presenti nel fluido prima che possano causare danni. La sua funzione infatti è quella di garantire il passaggio del fluido trattenendo le particelle inquinanti. È composto da un materiale poroso o fibroso, avvolto in forma cilindrica e sorretto da griglie metalliche per garantirne la stabilità strutturale.

Per aumentare l'efficienza, sfruttare al massimo la superficie disponibile per il filtraggio e conferire maggiore resistenza, il materiale filtrante viene pieghettato a fisarmonica. Una volta che il filtro è intasato, poiché non è possibile rigenerarlo, si procede a sostituirlo. Le diverse modalità con cui avviene la filtrazione all'interno dell'elemento saranno approfondite nella sezione 4.3, dove verranno analizzate le principali tecniche di filtrazione.

Nella figura 4.2 è raffigurato un esempio di elemento filtrante in cui è possibile notare la griglia di mantenimento, il materiale fibroso e cilindro su cui sono avvolti, mentre nella figura 4.3 è mostrata una cartuccia filtrante.

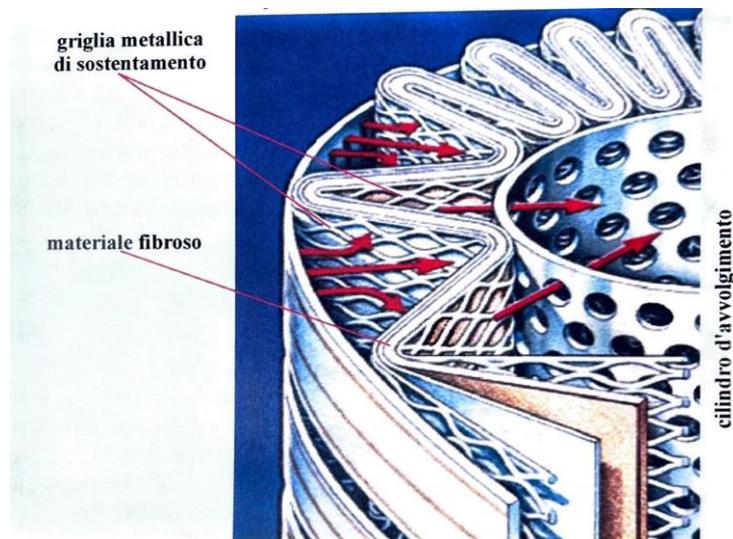


Figura 4.2 elemento filtrante



Figura 4.3 cartuccia filtrante

Per svolgere la loro funzione gli elementi filtranti oleodinamici possono essere realizzati con materiali diversi, ognuno dei quali con proprietà differenti, per adattarsi alle diverse esigenze di filtrazione e proteggere al meglio il circuito idraulico. [1]

Tra i principali mezzi filtranti impiegati si individuano:

- Rete metallica: è costituita da una barriera fisica con delle maglie regolari di dimensioni note, espresse in μm , attraverso le quali possono passare solo le particelle più piccole rispetto al

diametro della maglia. Questi setti sono impiegati soprattutto in applicazioni in aspirazione oppure come sistema alternativo quando interviene la valvola di bypass. I gradi di filtrazione variano da 10 a 2000 μm .

- Cellulosa (o carta impregnata di resina): Presenta una struttura irregolare ed è in grado di filtrare non solo le particelle in superficie, ma anche quelle all' interno di tutti gli strati. Il parametro che classifica questa tipologia di setti filtranti è la dimensione media dei pori, ossia quella delle particelle che possono trattenere.
- Microfibra (fibra di vetro inorganica): Offre una struttura più elaborata e protettiva rispetto a quella della cellulosa perché possiede tanti strati con dei pori che diventano man mano più piccoli. Questa struttura consente di bloccare particelle con dimensioni diverse.

Questi materiali sono fondamentali non solo per rimuovere le impurità, ma anche per garantire una buona efficienza complessiva del sistema: infatti, un buon elemento filtrante riduce l'usura dei componenti, mantiene costante la viscosità del fluido e prolunga la durata dell'impianto. [17]

Alcuni elementi fondamentali presenti nel filtro sono la valvola di bypass e l'indicatore di intasamento che verranno di seguito descritti e analizzati.

4.1.2 Valvola di bypass

La valvola di bypass è formata da un otturatore sulla bocca d'ingresso e interviene quando la pressione supera quella massima consentita evitando quindi delle perdite di carico superiori a quelle consentite. Più il filtro è intasato, maggiore sarà la pressione differenziale generata proprio dalle perdite di carico tra ingresso e uscita. Nella seguente figura 4.4 viene mostrata la sezione di un filtro con valvola di by pass. [1]

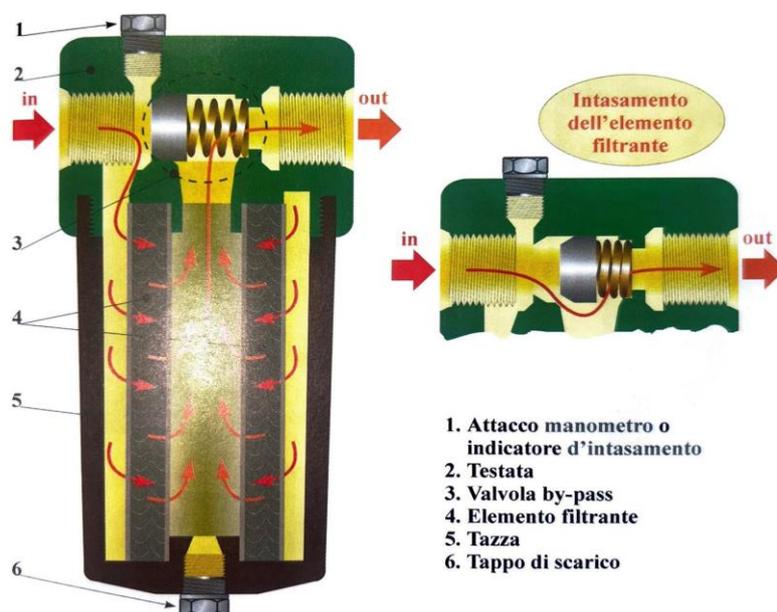


Figura 4.4 valvola di bypass

4.1.3 Indicatore d'intasamento

Non tutti i filtri sono provvisti di una valvola di bypass e, anche quando presente, non è semplice determinare in modo esatto quando l'elemento filtrante viene intasato. L'indicatore d'intasamento (o indicatore di servizio o di efficienza), montato sulla parte superiore del filtro, serve dunque a capire il momento di sostituzione o, dove è concesso, di depurazione dell'elemento filtrante. È

quindi un segnale del livello di accumulo. Nella figura 4.5 è possibile osservare tale configurazione.

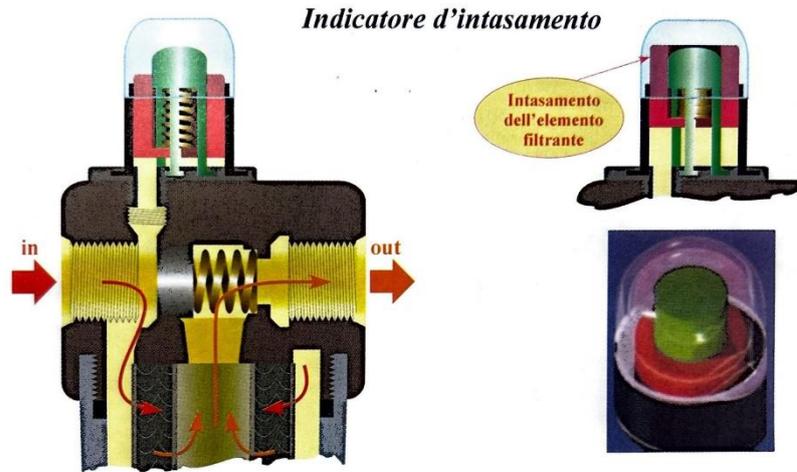


Figura 4.5 Indicatore di intasamento

Il principio di funzionamento è il seguente: all'interno di una piccola cupola trasparente si trovano due indicatori, uno di colore verde e l'altro di colore rosso. Quando il rosso copre completamente il verde, significa che la pressione differenziale ha superato il limite prestabilito, indicando un grado di intasamento massimo consentito.

Esiste anche una versione elettrica di questo indicatore, che consente il monitoraggio a distanza. In questo caso, un pressostato o la molla dell'indicatore ottico chiude un contatto elettrico che attiva una spia luminosa, un allarme sonoro o un altro sistema di segnalazione. Si può anche collegare un indicatore ottico come è possibile osservare nella figura 4.6. [1]

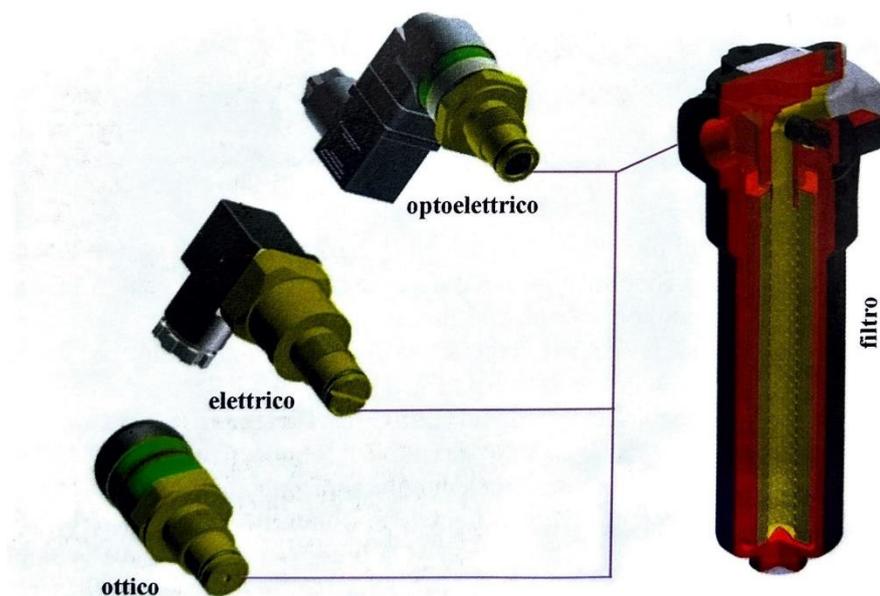


Figura 4.6 Indicatori di intasamento ottici ed elettrici

4.2 Proprietà dei filtri

Per capire quanto un filtro sia efficace, oltre ad analizzare la forma e il posizionamento, servono alcuni parametri che descrivono le reali prestazioni. Nelle successive sezioni verranno esaminate le principali proprietà.

4.2.1 Efficienza di filtrazione

L'efficienza di filtrazione, comunemente chiamata "Multi-pass test" o "Rapporto Beta", è probabilmente la proprietà più utile per quantificare quanto il filtro funziona correttamente. È definito dalla ISO 16889 e si può esprimere tramite la seguente formula:

$$\beta_{x\mu} = \frac{\text{numero di particelle maggiori di } x \text{ micron a monte del filtro}}{\text{numero di particelle maggiori di } x \text{ micron a valle del filtro}}$$

Dove $x\mu$ indica la grandezza relativa alle particelle.

Questo parametro esprime dunque la capacità di filtrazione di un determinato elemento, cioè quanto questo è in grado di "bloccare" le particelle solide presenti nel fluido.

Per realizzare la prova, vengono collegati tra loro formando un circuito chiuso una motopompa e un filtro in prova su un banco specifico. È presente un contatore automatico di particelle, sia a monte che a valle del filtro, col compito di fornire il numero e la dimensione delle particelle sulle parti opposte del filtro. La figura 4.7 schematizza il funzionamento appena descritto.

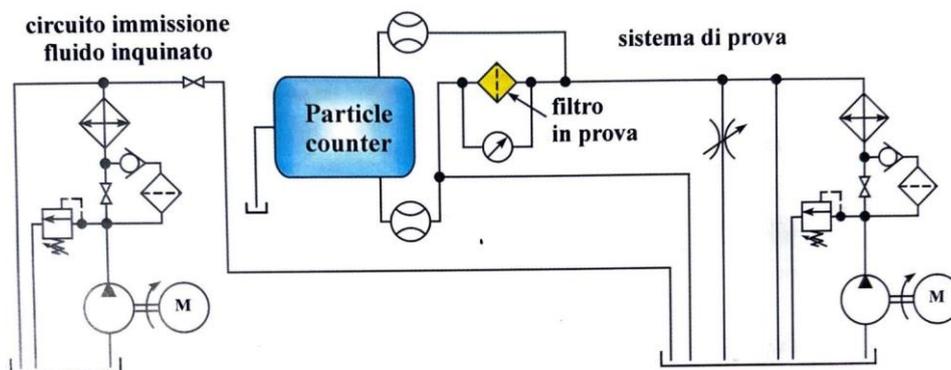


Figura 4.7 Schema multi-pass test

È possibile passare poi dal valore di $\beta_{x\mu}$ al suo corrispettivo in percentuale con la seguente formula: [1]

$$E_{x\mu} = \frac{\beta_{x\mu} - 1}{\beta_{x\mu}} \cdot 100$$

4.2.2 Capacità di ritenzione dei contaminanti

Un'altra proprietà fondamentale da considerare nella scelta di un filtro è la sua capacità di trattenere i contaminanti una volta catturati prima che si superi il Δp massimo consentito e quindi si attivi la valvola di bypass. Questo punto indica la condizione in cui il filtro è intasato.

Questo parametro è noto come Dirt Holding Capacity (DHC), ossia capacità di ritenzione dello sporco ed esprime dunque la capacità di accumulo del filtro.

Anche questo parametro, così come l'efficienza di filtrazione, viene determinato eseguendo il multi-pass test descritto nella precedente sezione. In quella prova si determina anche la quantità totale, espressa in grammi, di contaminante trattenuto dal filtro prima che si intasi.

È influenzato da diversi fattori, tra cui:

- Dimensione dei pori: al diminuire di questo fattore aumenta la perdita di carico e quindi la probabilità che il filtro vada in bypass.
- Densità e porosità dei pori: aumenta se diminuisce la dimensione dei pori.
- Materiale filtrante che può essere cellulosa o materiale sintetico. Quest'ultimo possiede una DHC più elevata perché presentano una porosità più fine e omogenea.

In sintesi quindi è importante avere un valore di DHC abbastanza alto per poter ridurre gli interventi di manutenzione e di conseguenza i costi operativi garantendo una maggior efficienza. [18]

4.2.3 Resistenza al collasso

Un altro parametro importante da considerare per determinare le dimensioni del filtro è la sua pressione differenziale massima Δp che l'elemento è in grado di sopportare senza subire danni strutturali. Man mano che la quantità di particelle trattenute cresce, aumenta anche la resistenza al passaggio del fluido e di conseguenza la differenza di pressione Δp tra ingresso e uscita. Se questo Δp supera il limite massimo sopportabile, il filtro potrebbe rompersi o deformarsi, mettendo a rischio la protezione dell'impianto.

Per questo motivo, ogni filtro viene progettato per resistere a un certo valore massimo di pressione differenziale, definito "pressione di collasso". Tale valore è determinato da alcune prove normate descritte nella ISO 2941:2009 in cui si pompa un fluido contaminato attraverso l'elemento filtrante osservando il momento in cui avviene il collasso o lo scoppio. [19] Si misura quindi la pressione differenziale massima senza che l'elemento arrivi a cedimento.

Questo valore dipende da diversi fattori, tra cui la classe di precisione e la geometria del mezzo filtrante e come esso è collocato all'interno dell'elemento filtrante, la superficie disponibile per la filtrazione, la viscosità e la portata.

In conclusione, è essenziale avere un alto valore di resistenza al collasso per garantire l'integrità dell'elemento filtrante, soprattutto in condizioni operative critiche, come ad esempio nei sistemi ad alta pressione. [1]

4.2.4 Compatibilità chimica

Un'altra proprietà importante è la compatibilità col tipo di fluido utilizzato e con i materiali di cui è fatto il filtro perché determina la capacità del filtro di non alterare le sue caratteristiche in risposta all'azione chimica del fluido. [20]

Come discusso nel capitolo 3, ogni fluido può contenere additivi, solventi o composti aggressivi che possono renderlo incompatibile ad alcuni materiali.

È quindi importante scegliere il filtro in base alla tipologia di fluido in uso, consultando le tabelle di compatibilità fornite dai produttori oppure facendo riferimento a normative specifiche, come la ISO 2943, che verifica la compatibilità del filtro con i fluidi idraulici standardizzati. [21]

4.2.5 Stabilità termica

Un'altra proprietà da tenere in considerazione nella scelta di un filtro è la stabilità termica, ovvero la capacità di mantenere le proprie caratteristiche fisiche e prestazionali anche a temperature elevate o variabili. In un impianto oleodinamico, la temperatura del fluido può raggiungere valori anche molto alti e se l'elemento filtrante non è abbastanza resistente può subire deformazioni, o perdite di efficienza, compromettendo il processo di filtrazione. La stabilità termica dipende dal materiale del mezzo filtrante e dalla qualità delle guarnizioni e degli adesivi utilizzati per assemblare il filtro.

È importante garantire una buona stabilità termica per avere una filtrazione uniforme anche in presenza di variazioni di temperatura. [1]

4.2.6 Proprietà aggiuntive

Oltre alle caratteristiche descritte, esistono anche altre proprietà e requisiti applicativi che sono determinanti per la scelta del filtro più adatto in base al contesto operativo. Tra questi si possono menzionare:

- Caduta di pressione iniziale: corrisponde alla differenza di pressione tra ingresso e uscita e quindi è importante che non sia troppo elevata per non penalizzare l'efficienza
- Durata operativa: rappresenta il tempo durante il quale l'elemento filtrante svolge correttamente la sua funzione prima di intasarsi. Maggiore è la durata, minore sarà la frequenza con cui si sostituisce il fluido.
- Costruzione adatta per garantire facilità di manutenzione e sostituzione: in questo modo si riducono i tempi di fermo impianto e i costi
- Resistenza a pressioni nominali, sovrappressioni e sollecitazioni meccaniche
- Dimensioni compatte e peso contenuto
- Basso costo iniziale

Tutte le proprietà elencate e i requisiti appena esposti servono a garantire una maggiore affidabilità del sistema, durata dei componenti, efficienza economica e del sistema. [1]

4.3 Tecniche di filtrazione

Oltre a descrivere come è fatto l'elemento filtrante è importante anche capire come effettivamente funziona e tal proposito è necessario distinguere due principali tecniche di filtrazione delle particelle:

- Filtrazione di superficie
- Filtrazione di profondità

Entrambe le tecniche verranno analizzate nelle successive sezioni. [1]

4.3.1 Filtrazione di superficie

Nella tecnica di filtrazione di superficie le particelle più grandi della maglia si depositano sul lato esposto al passaggio del fluido e quindi non attraversano la struttura, ma rimangono sulla superficie del materiale filtrante.

Una tipologia di elementi filtranti di superficie, visibile in figura 4.8, è costituita da una rete metallica a maglie quadrate di dimensioni note, avvolta in forma cilindrica e fissata alle estremità con dischi sagomati. Questo tipo di filtro consente di trattenere particelle fino a $25\ \mu m$.

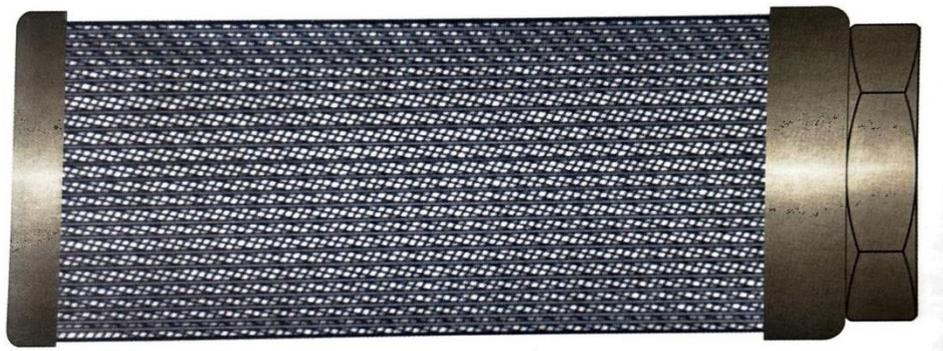


Figura 4.8 Elemento filtrante di superficie con maglia quadrata

Un'altra tipologia di elementi filtranti di superficie, mostrata in figura 4.9, è costituita da un filo metallico triangolare o dentellato, avvolto attorno a un cilindro forato. Il filo è realizzato in bronzo, ottone, acciaio inox o altre leghe che garantiscono resistenza a corrosione. Questo tipo di configurazione permette una capacità di filtrazione minima di $25\ \mu m$. Tuttavia, questa configurazione viene sconsigliata in alcune applicazioni in ambito oleoidraulico.

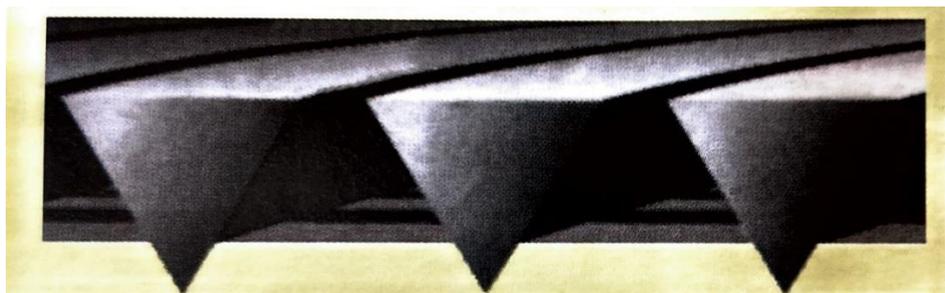


Figura 4.9 Elemento filtrante di superficie con filo metallico triangolare

In generale, questa tecnica possiede grado di filtrazione compreso tra 0,1 e 100 μm , efficienza di filtrazione fino al 99,99%, capacità di trattenere i contaminanti limitata alla superficie del filtro e quindi è spesso necessaria una sostituzione e pulizia. Si presta in maniera ottimale a situazioni in cui il flusso è costante e controllato e quindi permette un monitoraggio più accurato delle particelle rimosse. È indicata anche quando il tipo di contaminante presenta particelle fini e uniformi e quando ci si trova nella fase finale del processo.

Tale metodologia può essere applicata in svariati ambiti nel settore industriale tra cui: [1] [22]

- Produzione di farmaci
- Filtrazione di acqua in applicazioni elettroniche
- Sterilizzazione del vino e bevande
- Filtrazione di solventi e reagenti nell'industria chimica

4.3.2 Filtrazione di profondità

È una tecnica che utilizza materiali porosi che possiedono più strati con fori ciechi e passanti, come ad esempio fibre intrecciate, cellulosa, resina o polimeri. Viene creata una struttura tridimensionale con dei pori con dimensioni diverse e quando viene fatto passare il fluido, le impurità si depositano in posizioni diverse all'interno dell'elemento filtrante in base alle loro dimensioni. Questo tipo di meccanismo, poiché è in grado di distribuire le impurità lungo tutto lo spessore del materiale, permette di accumulare una grande quantità di contaminanti senza che la pressione differenziale cresca rapidamente.

I mezzi filtranti di profondità sono formati da fibre capillari disposte in modo casuale, che creano percorsi tortuosi per il fluido. Il liquido quindi rallenta facilitando la deposizione delle impurità all'interno delle fibre. Prima veniva utilizzato il feltro che attualmente è stato sostituito da materiali più moderni come carta con fibre di cellulosa, nylon o altri polimeri sintetici.

Il processo di filtrazione di tali elementi è illustrato nella figura 4.10

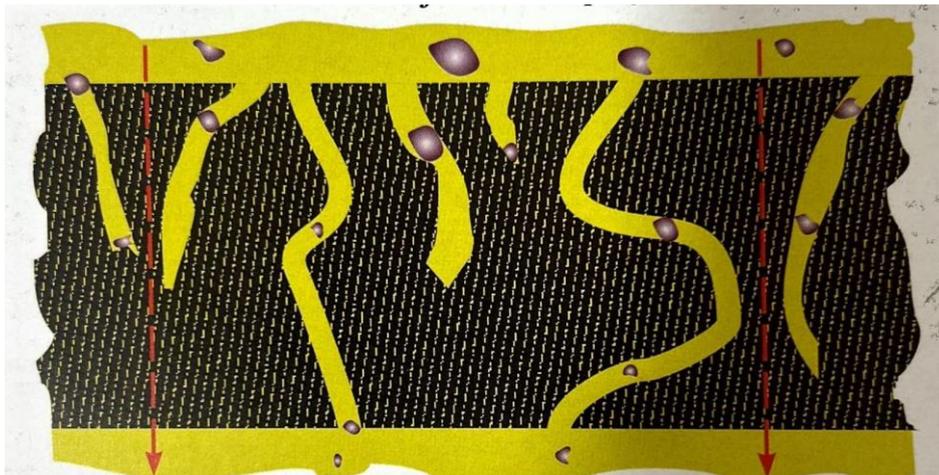


Figura 4.10 Processo di filtrazione di profondità

In generale, questa metodologia presenta un grado di filtrazione che varia da 1 μm a più di 100 μm in base al materiale, una capacità di trattenere i contaminanti elevata e un'efficienza di nominale, cioè indicativa e non assoluta, che tende a migliorare progressivamente man mano che le particelle vengono catturate all'interno della struttura porosa del filtro.

La filtrazione di profondità, al contrario di quella di superficie, risulta essere adatta in condizioni di flusso variabile poiché, grazie alla sua struttura tridimensionale, mantiene un'efficienza elevata. Inoltre, è particolarmente indicata per filtrare contaminanti più grossolani e nelle fasi preliminari del processo. Grazie alle sue caratteristiche e proprietà può essere utilizzata in diverse applicazioni industriali, tra cui: [1] [22]

- Pre-filtrazione di succhi e bevande alcoliche, poiché è necessario rimuovere le impurità sospese senza alterare il profilo organolettico.
- Pre-filtrazione delle acque impiegate nei processi industriali
- Filtrazione di emulsioni o sospensioni utilizzati nella produzione di cosmetici
- Filtrazione di vernici

4.3.3 Confronto tra filtrazione di superficie e filtrazione di profondità

Per comprendere meglio le principali differenze tra le due tecniche di filtrazione descritte precedentemente, di seguito viene proposta una tabella comparativa (tab 4.1) accompagnata dalla figura 4.11 che mette a confronto le due modalità. [22]

Caratteristica	Filtrazione di profondità	Filtrazione di superficie
Materiale	Stati di fibre o cellulosa	Membrane o tessuti uniformi
Modalità di trattenimento	Distribuita all'interno del filtro	Localizzata sulla superficie del filtro
Precisione di filtrazione	Media	Alta
Durata del filtro	Lunga (carico distribuito)	Media (carico localizzato)
Applicazioni principali	Filtrazione preliminare e grossolana	Filtrazione sterile e finale

Tabella 4.1 Confronto tra filtrazione di superficie e di profondità

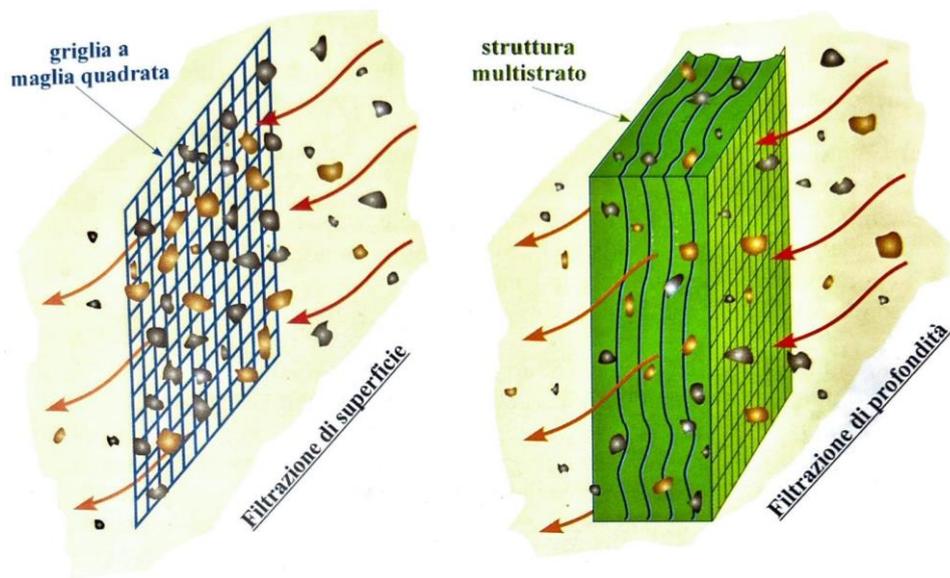


Figura 4.11 Confronto fra filtrazione di superficie e di profondità

4.4 Collocazione dei filtri

Oltre alla scelta del tipo di filtro e del mezzo filtrante, un ulteriore aspetto fondamentale da considerare è il corretto posizionamento del filtro all' interno del sistema. Infatti, in base a dove è collocato, il filtro svolge diverse funzioni.

Le principali modalità di installazione sono le seguenti:

- Filtro in aspirazione
- Filtro in mandata
- Filtro in scarico
- Filtro off line
- Filtro di sfiato (breather filter)

Nei successivi paragrafi verranno studiate nel dettaglio queste configurazioni, analizzando la struttura e la funzione svolta da ciascuna. [1]

4.4.1 Filtro in aspirazione

Il filtro in aspirazione è posizionato davanti alla pompa e ha il compito fondamentale di bloccare l'ingresso nel circuito di particelle di grandi dimensioni che si trovano nel serbatoio, evitando che entrino nel circuito e possano danneggiare gli altri filtri che sono invece progettati per filtrare le particelle più piccole o medie. Nella figura 4.12 viene illustrato lo schema generico per un filtro in aspirazione, mentre nelle 4.13 la generica sezione.

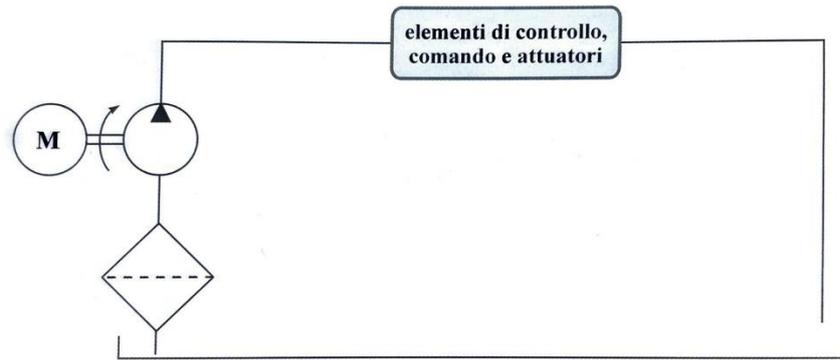


Figura 4.12 Schema generico per filtro in aspirazione

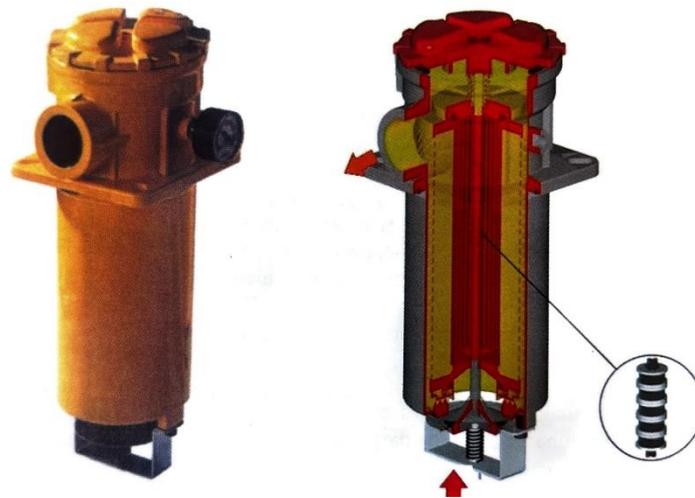


Figura 4.13 Sezione di un filtro in aspirazione

I filtri in aspirazione possiedono un grado di filtrazione compreso tra 60 e 250 μm e quindi sono progettati, come già accennato precedentemente, con una maglia larga per trattenere solo particelle grandi. Questa scelta progettuale è necessaria perché, se la maglia fosse più stretta, questa ostacolerebbe il passaggio dell'olio creando una resistenza al flusso che potrebbe abbassare la pressione in aspirazione dando vita al fenomeno della cavitazione, gravemente dannoso per la pompa. Inoltre, per evitare questo fenomeno, il limite massimo consentito per la perdita di pressione tra ingresso e uscita è di 0,1 *bar* (molto bassa). È molto importante quindi porre attenzione alle macchine sottoposte a partenza con basse temperature poiché in queste circostanze, l'olio diventa più viscoso generando un aumento della perdita di carico. Risulta necessario dunque scegliere un olio adatto alle basse temperature. In caso contrario bisogna sostituire la cartuccia filtrante, consultando i cataloghi tecnici, con una con capacità di filtraggio minore e che quindi offre meno resistenza al passaggio del fluido, pur accettando una perdita di efficienza.

Tuttavia, nei casi in cui le pompe sono troppo sensibili alla pressione in aspirazione, si deve rinunciare all'uso dei filtri in aspirazione perché comprometterebbero il funzionamento della pompa.

Esistono due principali modalità di montaggio del filtro:

- Filtro immerso nel serbatoio: l'elemento filtrante è avvitato sul tubo di aspirazione. È più economico ma se si vuole sostituirlo bisogna svuotare il serbatoio e quindi è probabile che alcune impurità cadano sul fondo
- Filtro flangiato al serbatoio: il filtro è montato sulla parete del serbatoio. È più ingombrante ma più facile da sostituire perché basta estrarre la cartuccia filtrante senza dover svuotare il serbatoio. [1]

4.4.2 Filtro in mandata

Un filtro in mandata viene posizionato subito dopo la pompa e ricopre la funzione essenziale di proteggere l'intero impianto, una parte di esso oppure un componente che richiede un livello di una decontaminazione maggiore. Nella seguente figura 4.14 viene mostrato lo schema generico per i filtri in mandata, mentre nella 4.15 una generica sezione.

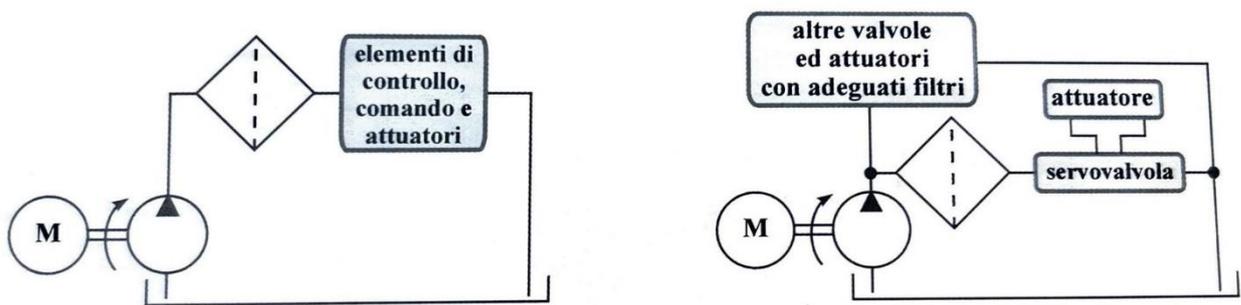


Figura 4.14 Schema generico per filtro in mandata

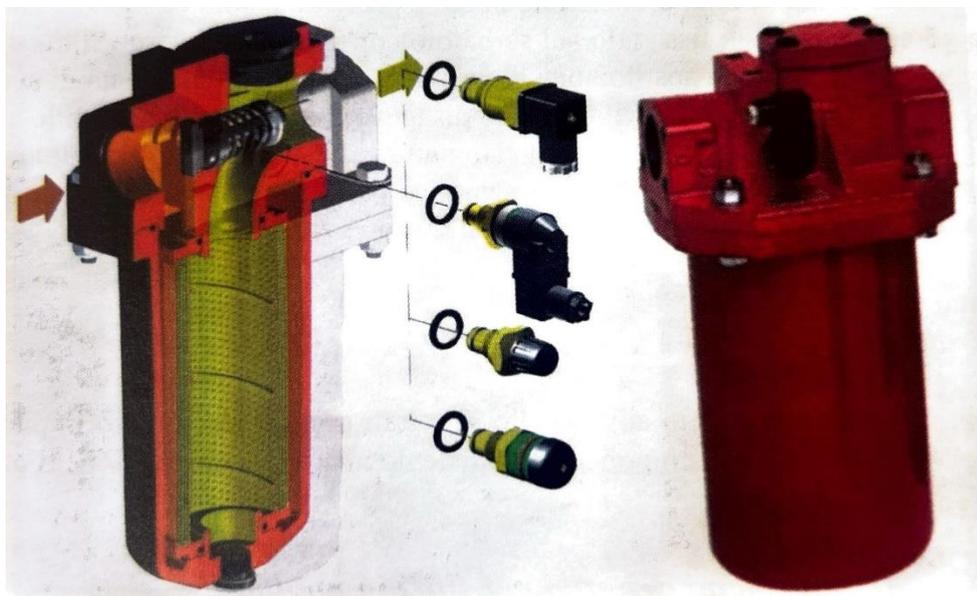


Figura 4.15 Sezione di un filtro in mandata

In questa tipologia di configurazione gli elementi filtranti possiedono una maglia più piccola e di conseguenza è possibile tollerare anche una pressione differenziale tra ingresso e uscita maggiore. Il grado di filtrazione massimo raggiunto è di $3 \mu\text{m}$. Poiché il corpo deve sopportare anche delle pressioni nominali alte, il costo della produzione sarà inevitabilmente maggiore.

Oltre a ricoprire una funzione protettiva, i filtri mandata vengono utilizzati quando quelli in aspirazione non possono essere impiegati per le ragioni prima esposte; in questo caso si inserisce

un primo filtro in mandata di maglia grossolana per non creare resistenza al flusso e un secondo rimuovere le impurità generate da valvole di comando e attuatori. [1]

4.4.3 Filtro in scarico

Un filtro in scarico viene posizionato sulla linea di ritorno ed è la configurazione più utilizzata negli impianti oleoidraulici di piccole e medie dimensioni. Hanno la funzione di filtrare il fluido da particelle che provengono dall'esterno o che si formano per via dell'usura dei componenti. Presentano lo svantaggio di necessitare di un unico tubo di scarico collegato al serbatoio e quindi tutti i componenti scaricano nello stesso tubo; proprio per questo motivo, in molte situazioni, è necessario inserire un filtro all'aspirazione. Nella figura 4.16 è mostrato lo schema generico per un filtro in scarico, mentre nella 4.17 una generica sezione.

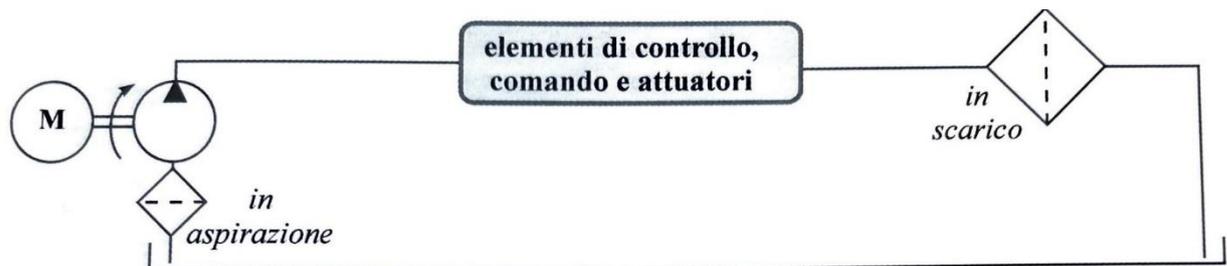


Figura 4.16 Schema generico per filtro in scarico

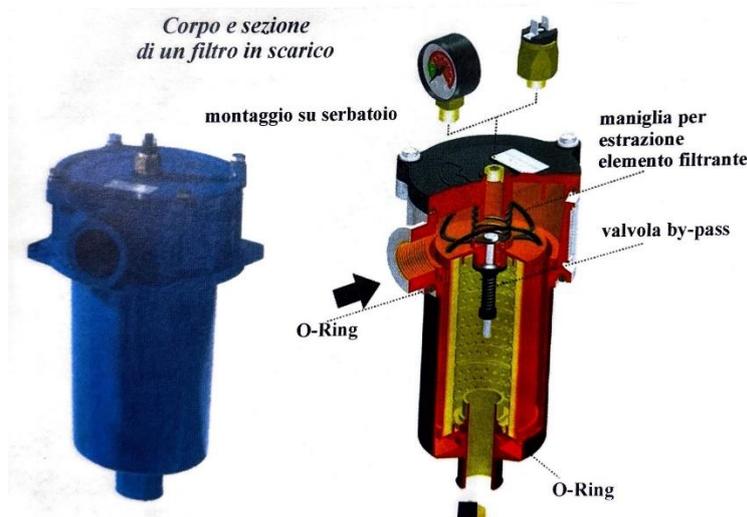


Figura 4.17 Sezione di un filtro in scarico

Tale configurazione presenta solitamente un grado di filtrazione compreso tra 25 e 125 μm ma, può estendersi da 3 a 250 μm . Gestisce portate da 100 a 1550 l/min. Per evitare rotture o deformazioni, il filtro deve rispettare la pressione massima che c'è nella linea di scarico dell'impianto e quindi deve essere scelto in base a questo. In generale, i filtri in scarico possono sopportare pressioni che vanno dai 3 ai 25 bar.

Un limite operativo di questa configurazione è che non può essere adottata in circuiti chiusi come sistemi di trazione idrostatica o organi idraulici poiché, quando si inverte il senso di marcia, la linea che inizialmente scaricava diventa quella in pressione e quindi, un filtro in queste condizioni, potrebbe trovarsi sottoposto ad alta pressione nonostante non sia progettato per questo.

Quando si sceglie un filtro per la linea di ritorno, bisogna tenere conto della portata effettiva poiché la quantità di olio che rientra al serbatoio spesso è molto maggiore di quella che esce dalla pompa per la presenza di accumulatori, valvole di scarico rapido e cilindri differenziali.

Esistono due modalità di montaggio dei filtri in scarico, illustrati in figura 4.18:

- Filtri montati in linea: sono montati direttamente sulla tubazione, tra due tratti di tubo. È un montaggio più raro.
- Filtri flangiati al serbatoio: sono montati direttamente sul serbatoio e in questo caso il corpo del filtro resta all' esterno e la parte filtrante entra dentro il serbatoio. È il montaggio più diffuso. La tazza interna del filtro è dotata di una prolunga che arriva fin sotto il livello minimo del fluido. Inoltre in alcuni tipi è presente anche un tappo addizionale per il riempimento o rabbocco dell'olio. [1]

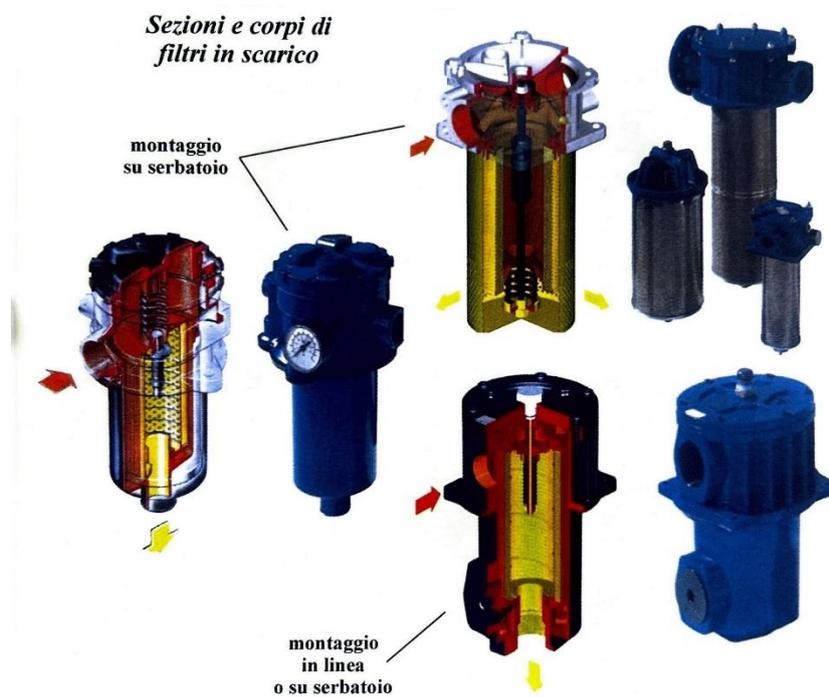


Figura 4.18 Modalità di montaggio di filtri in scarico

4.4.4 Filtro off line

Nella configurazione off line o a ricircolo i filtri non sono inseriti nel circuito idraulico principale e lavorano in modo indipendente. L' olio viene quindi prelevato dal serbatoio e inviato al filtro collegandosi alla pompa principale o più spesso con una piccola pompa elettrica indipendente. Nella figura 4.19 è illustrato lo schema generico per i filtri off-line.

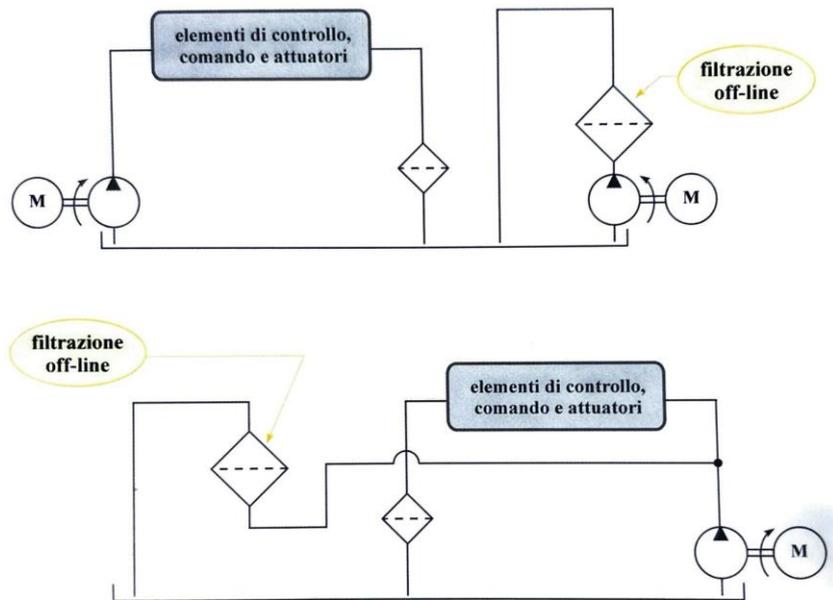


Figura 4.19 Schema generico per filtrazione off-line

La portata di olio è circa il 10-20% del volume totale del serbatoio.

Questa metodologia viene impiegata in tre applicazioni principali:

- Come supporto a un sistema già filtrato: il sistema off-line aiuta, lavorando in parallelo, a garantire una pulizia maggiore poiché può funzionare durante le soste brevi e prolungate, per esempio quando l'impianto è fermo. Tale applicazione, consente di cambiare il filtro senza dover fermare l'impianto principale e, poiché è indipendente dal circuito, non subisce vibrazioni o variazioni di pressione
- Per la ricarica del fluido: è la soluzione ottimale per evitare la contaminazione iniziale
- Decontaminazione ciclica o sporadica del fluido: in questo caso è preferibile che la macchina sia ferma. [1]

4.4.5 Filtro di sfiato dell'aria

Quando la macchina è in funzione gli attuatori assorbono o rilasciano olio, quindi il livello del fluido nel serbatoio cambia e di conseguenza anche il volume d'aria sopra il fluido. Per compensare tali variazioni di volume sono necessarie delle bocche di sfiato sulla parte superiore del serbatoio che lasciano entrare o uscire aria ed evitano pressioni o depressioni dannose. È essenziale però che le bocche siano protette da filtri dell'aria poiché quest'ultima può contenere diverse impurità come polvere, sporco o umidità.

Gli elementi filtranti utilizzati possono essere in paglia meccanica, materiali porosi, smontabili e lavabili oppure in carta pieghettata con struttura più sofisticata e da sostituire. La scelta viene fatta in base al grado di decontaminazione richiesto dal sistema: più sensibile sarà l'impianto idraulico, per esempio in sistemi ad alta precisione, più alta sarà la qualità del filtro dell'aria. [1]

4.5 Filtri con configurazioni particolari

Oltre alle configurazioni appena descritte, ne esistono altre che si distinguono per caratteristiche costruttive o funzionali specifiche. Queste soluzioni sono progettate per soddisfare particolari esigenze. Tra le più importanti è possibile citare:

- Filtri spin-on
- Filtri autopulenti
- Filtri duplex
- Filtri magnetici

Nei successivi paragrafi verrà descritto il loro funzionamento e i contesti applicativi. [1]

4.5.1 Filtri spin-on

I filtri spin-on presentano una struttura molto simile a quella dei filtri usati per il gasolio e l'olio motore delle automobili. In oleodinamica sono molto diffusi soprattutto nel settore mobile e in alcune applicazioni stazionarie.

Questa tipologia consente una portata massima di 350 *l/min* e una pressione massima di 12 *bar*. La testata del filtro è assemblata in linea direttamente sulle tubazioni, che servono anche per fissare il filtro. Solitamente è presente anche una valvola di bypass o degli accessori per segnalare quando il filtro è intasato e poiché l'elemento filtrante è incorporato nella tazza, questo non può essere pulito e viene sostituito tutto insieme.

Il vantaggio principale di questa tipologia è la facilità e rapidità con cui si possono sostituire che risulta essere molto utile soprattutto sui mezzi mobili riducendo i costi e facilitando gli interventi di manutenzione. Infatti, il filtro è formato da un unico pezzo, ossia la tazza con l'elemento filtrante, che si avvita semplicemente sulla testata: da qui il nome "spin-on" (avvitare sopra).

Nella figura 4.20 è mostrato un esempio di filtro spin on. [1]



Figura 4.20 Filtri spin-on

4.5.2 Filtri autopulenti

I filtri autopulenti, osservabili in figura 4.21, sono costituiti da un corpo e da un elemento filtrante di superficie e sono dotati di un sistema che permette di pulirli automaticamente o manualmente con un raschietto che può essere azionato dall' esterno senza dover fermare la macchina.

Questo raschietto “gratta” via lo sporco accumulato sulla superficie filtrante, facendolo cadere sul fondo della tazza del filtro. Periodicamente, il personale addetto ha il compito di svuotare la tazza per eliminare le impurità raccolte. [1]

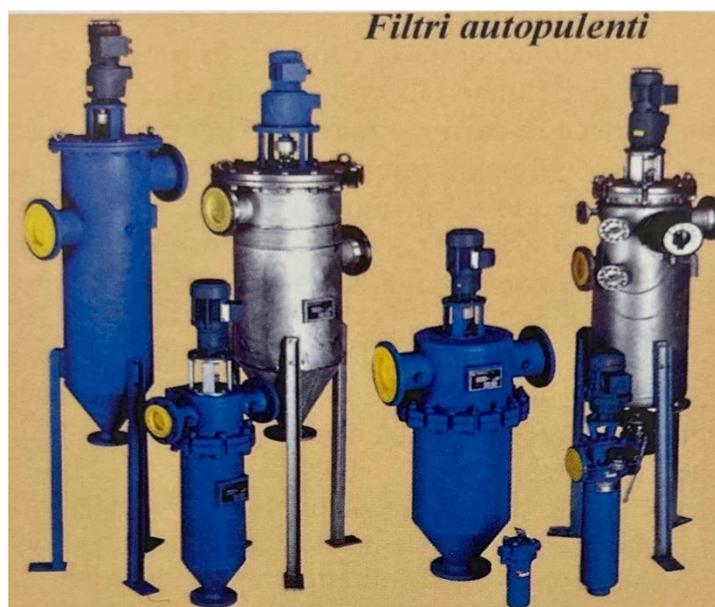


Figura 4.21 Filtri autopulenti

4.5.3 Filtri duplex

I filtri duplex presentano una configurazione composta da due filtri identici in parallelo in modo tale da poter sostituire quello intasato senza dover fermare la macchina. I due filtri vengono inseriti grazie a un deviatore manuale a sfera 3/2.

Nella figura 4.22 viene illustrato lo schema generico di questa configurazione e due esempi di filtri duplex posti in scarico e in mandata. [1]

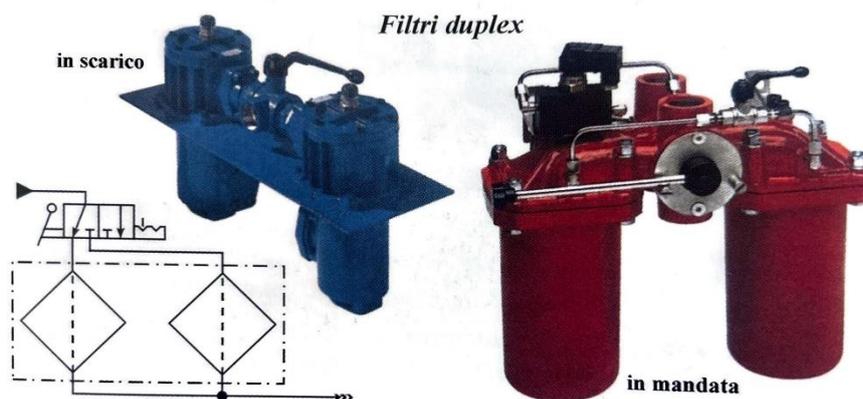


Figura 4.22 Filtri duplex

4.5.4 Filtri magnetici

I filtri magnetici sono dispositivi progettati col fine di trattenere le particelle ferrose presenti nel fluido, rallentando quindi i processi di contaminazione e intasamento. Una delle soluzioni più semplici, osservabile in figura 4.23, consiste nell'inserire all'interno del filtro una colonnetta a magnete permanente, capace di attirare e trattenere le particelle metalliche di natura ferromagnetica.

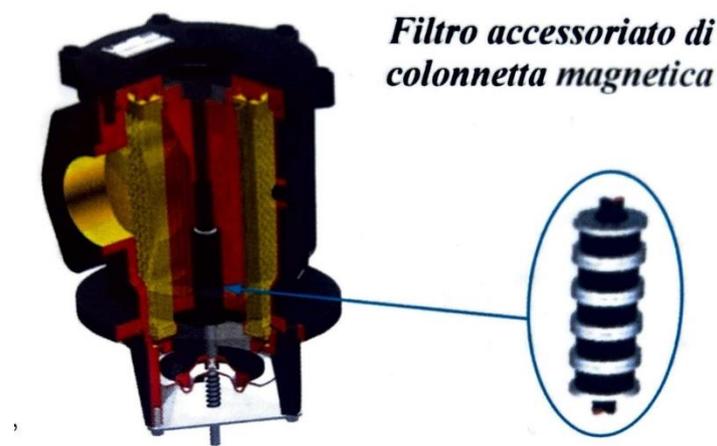


Figura 4.23 Filtro con colonna magnetica

Questa soluzione però risulta poco efficace in presenza di portate ad elevata velocità e particelle molto fini e anche con flussi più lenti è necessario garantire che non ci siano cambi repentini di velocità che potrebbero far ricircolare le impurità depositate.

Proprio per superare questi limiti sono stati proposti alcuni filtri magnetici basati su sistemi a flusso controllato in cui si massimizza il contatto tra fluido e superfici magnetiche. Questi filtri sono in grado di trattenere anche particelle molto piccole, fino a $1 \mu m$, senza consumare acqua o energia elettrica. Con questa soluzione si ottiene una maggiore pulizia e durata del lubrificante, minore abrasione di macchine e utensili e una riduzione dei costi e consumi. [1] [23]

5. Strumentazione

L'attività sperimentale svolta in laboratorio è importante per comprendere le proprietà dei fluidi idraulici e capire a fondo il controllo della loro qualità. Impiegando strumenti specifici, è stato possibile misurare con precisione grandezze fondamentali come viscosità, densità e livello di contaminazione, che influenzano le prestazioni e l'affidabilità dei sistemi oleodinamici.

Questa sezione raccoglie una panoramica delle apparecchiature disponibili in laboratorio per l'analisi dei fluidi, accompagnata da una descrizione del principio di funzionamento di ciascuno strumento, delle modalità operative e delle prove eseguite. Tra gli strumenti utilizzati figurano il viscosimetro rotazionale, il viscosimetro Engler, il viscosimetro capillare, il contatore di particelle Pall e il densimetro a bilancia. Per ciascuno strumento verranno presentate fotografie, descrizione dell'uso e indicazioni operative per eseguire correttamente le misurazioni. È importante segnalare che per quanto riguarda il viscosimetro capillare non sono state effettuate prove sperimentali ma ci si è limitati a fornire una descrizione del principio di funzionamento e della sua struttura.

L'obiettivo è fornire non solo una comprensione tecnica delle misure effettuate, ma anche una guida pratica all'utilizzo corretto degli strumenti, utile per ripetere le prove in autonomia o in ambito applicativo.

5.1 Viscosimetro rotazionale

Il viscosimetro rotazionale è uno strumento che si utilizza per misurare la viscosità dei fluidi. Si osserva quanto resistono alla rotazione di un corpo immerso al loro interno.

5.1.1 Funzionamento

Il dispositivo, visibile in figura 5.1, è costituito da un albero motore a cui viene collegato un mandrino (girante) che sarà immerso nel fluido da analizzare. Quando l'albero mette in rotazione il mandrino, il fluido oppone una resistenza proporzionale alla sua viscosità. Questa resistenza genera una coppia che viene rilevata con precisione da un sensore ottico, il quale misura lo scostamento angolare tra l'albero motore e quello solidale al mandrino. È proprio grazie a tale scostamento che è possibile calcolare con accuratezza la viscosità dinamica del campione, generalmente espressa in centipoise (cP) o $\text{mPa}\cdot\text{s}$. [24]



Figura 5.1 Viscosimetro rotazionale

5.1.2 Misurazioni

Le misurazioni sono state effettuate su un campione di olio, il 5W30, mantenuto in un contenitore immerso in un bagno termostato a circolazione di acqua distillata, con temperatura regolabile tra 10 °C e 90 °C. Dopo aver montato correttamente la testa del viscosimetro sul supporto verticale e rimosso il cappuccio protettivo dell'albero, è stato installato il mandrino e immerso completamente nell'olio. Nella figura 5.2 è possibile osservare la testa del viscosimetro e il suo display.



Figura 5.2 Testa del viscosimetro rotazionale con display

A fianco del mandrino è stata immersa anche la sonda di temperatura (in figura 5.3), collegata allo strumento per la lettura diretta della temperatura del fluido.



Figura 5.3 Sonda di temperatura

Prima dell'avvio delle prove, il viscosimetro ha eseguito una fase di azzeramento automatico, durante la quale l'albero mostrato in figura 5.4 ruota senza carico per azzerare eventuali errori iniziali.

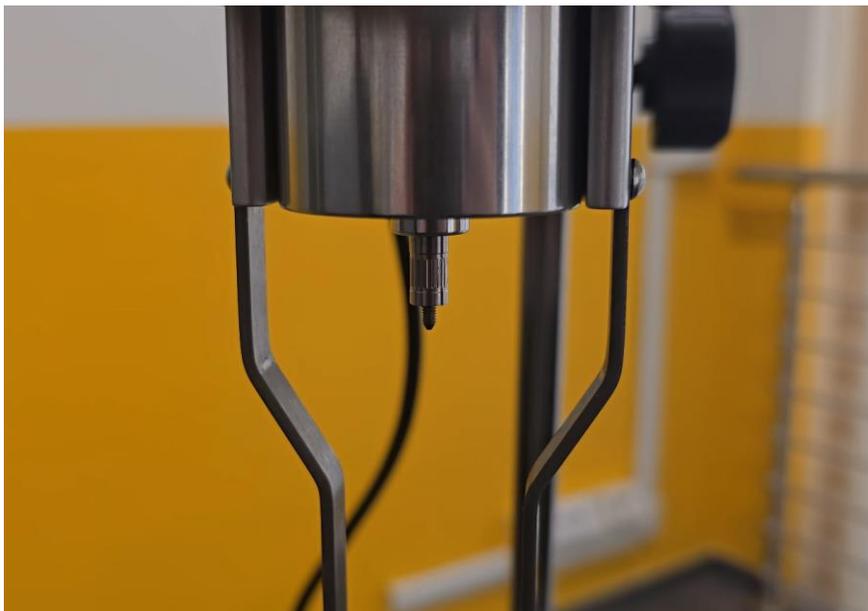


Figura 5.4 Fase di azzeramento automatico

Successivamente, la testa del viscosimetro è stata regolata in altezza per garantire che il mandrino fosse completamente immerso, e si è provveduto ad avviare il test. Questa fase è illustrata in figura 5.5



Figura 5.5 Regolazione della testa

Affinché il sensore di coppia sia stabile e la lettura quindi sia affidabile, la durata minima di ogni prova, come si può notare in figura 5.6, è stata impostata a 20 secondi.



Figura 5.6 Settaggio della durata della prova

Durante ogni test, il display del viscosimetro mostra in tempo reale i valori di viscosità, temperatura del fluido e percentuale di coppia, parametro fondamentale per valutare la qualità della misurazione. I tre valori, riferiti alla temperatura dell'acqua di 27°C, sono rispettivamente

mostrati in figura 5.7, figura 5.8 e figura 5.9. La percentuale di coppia si riferisce alla coppia massima che il viscosimetro è in grado di generare con quel determinato mandrino e a quella velocità di rotazione. È un indice di quanto sforzo sta facendo lo strumento per vincere la resistenza del fluido. Tale parametro deve essere superiore al 10% per garantire risultati affidabili e rientrare nel campo di sensibilità dello strumento.



Figura 5.7 Valore di viscosità rilevato a 27°C



Figura 5.8 Temperatura del fluido rilevata a 27°C



Figura 5.9 Percentuale di coppia rilevata a 27°C

Le misure sono state eseguite osservando il comportamento del fluido a diverse temperature: 20 °C, 25 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C e 70 °C. Per le temperature inferiori o uguali a 30 °C è stata utilizzata una velocità di rotazione pari a 30 *rpm*, mentre per quelle superiori si è scelto di operare a 60 *rpm*, ovvero la velocità massima consentita dallo strumento. Questa scelta è stata dettata dall'esigenza di garantire la stabilità della misura e un'adeguata sensibilità strumentale, poiché a basse temperature la viscosità è maggiore e richiede velocità più contenute per evitare comportamenti anomali del fluido. È stato necessario adottare questo accorgimento quindi per mantenere la percentuale di coppia all'interno di un range ottimale, evitando letture instabili o imprecise. A titolo esemplificativo, di seguito vengono riportate tre immagini, figura 5.10, figura 5.11 e figura 5.12, relative alla prova effettuata a 40 °C che evidenziano rispettivamente il cambio di velocità di rotazione impostata a 60 *rpm*, la percentuale di coppia e il valore di viscosità misurato. Questi dati confermano la necessità di adeguare la velocità di rotazione in funzione della temperatura, al fine di mantenere le misure ottenute entro parametri affidabili.



Figura 5.10 Cambio di velocità di rotazione a 40°C



Figura 5.11 Percentuale di coppia rilevata a 40°C



Figura 5.12 Valore di viscosità rilevato a 40°C

5.1.3 Analisi risultati

Per ogni condizione sperimentale sono state eseguite da 5 a 10 misurazioni consecutive, aspettando ogni volta che il valore si stabilizzasse. I dati ottenuti sono stati poi mediati e utilizzati per costruire una curva temperatura-viscosità rappresentativa del comportamento del fluido illustrata figura 5.13.

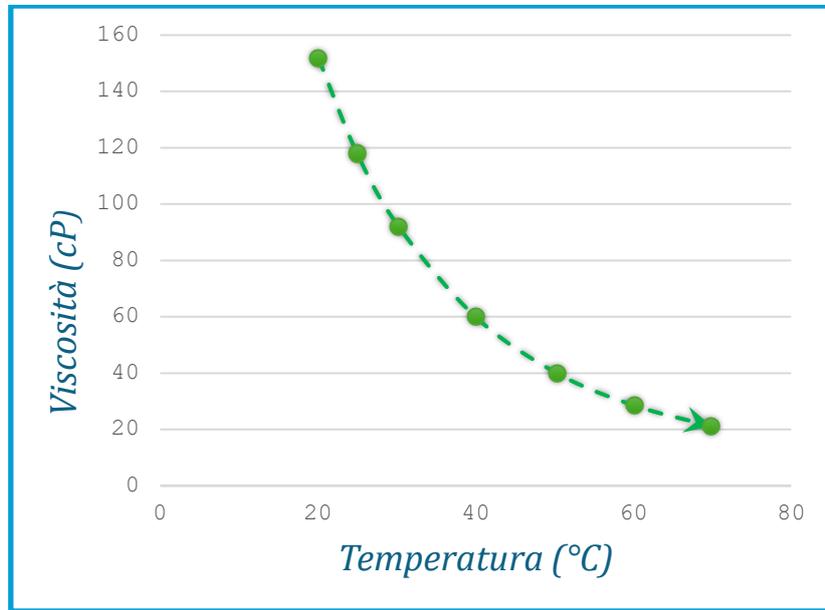


Figura 5.13 Curva temperatura- viscosità

Dal grafico ottenuto è possibile osservare l'andamento decrescente della viscosità in funzione della temperatura. Questo comportamento è del tutto coerente con ciò che ci si aspettava: all'aumentare della temperatura, le molecole si muovono più velocemente riducendo le forze intermolecolari che generano attrito. Di conseguenza, la viscosità del fluido sarà minore man mano che la temperatura aumenta. Analizzando la curva si evidenzia una diminuzione graduale e continua della viscosità: è possibile quindi dedurre che la relazione che lega le due variabili sia di tipo esponenziale o logaritmico inverso. Inoltre, si osserva una variazione di viscosità più marcata alle basse temperature ed è sempre meno evidente man mano che la temperatura si avvicina ai 70 °C, suggerendo che il fenomeno tende a stabilizzarsi e a saturarsi.

5.2 Viscosimetro Engler

Tra gli strumenti utilizzati in laboratorio per la misura della viscosità è stato impiegato anche il viscosimetro Engler, il cui principio di funzionamento si basa sul confronto tra il tempo di deflusso di un fluido e quello dell'acqua distillata a pari condizioni.

5.2.1 Funzionamento

Lo strumento, visibile in figura 5.14, è composto da un recipiente interno di ottone, dotato di un foro calibrato alla base, il quale può essere chiuso tramite un'asta dall'alto. Tale recipiente è inoltre munito di un coperchio che protegge il serbatoio contenente l'olio e attorno a quest'ultimo è presente un contenitore esterno riempito d'acqua che viene riscaldato attraverso una resistenza elettrica.

Dalla figura 5.14 è possibile notare anche una spia rossa luminosa, posta sul lato sinistro dello strumento. Questa, ha il compito di segnalare lo stato di funzionamento della resistenza elettrica: si accende quando la resistenza è attiva e sta riscaldando l'acqua nel bagno termostatico, si spegne quando è stata raggiunta la temperatura voluta e la resistenza si disattiva temporaneamente. Questo indicatore è utile per tenere sotto controllo che la temperatura sia mantenuta costante durante la prova.



Figura 5.14 Viscosimetro Engler

Prima di avviare ciascuna prova sperimentale, si è proceduto a verificare il posizionamento dello strumento, assicurandosi che il viscosimetro fosse correttamente livellato. Questo passaggio è fondamentale per garantire la regolarità del flusso del fluido. Il controllo è stato eseguito utilizzando una livella a bolla posizionata su più punti della struttura, in modo da garantire l'uniformità della fuoriuscita del fluido e soprattutto evitare di falsare i tempi di efflusso. Solo dopo essersi accertati che la base fosse perfettamente orizzontale e stabile, si è dato inizio alle misurazioni. In figura 5.15 è possibile osservare lo strumento perfettamente livellato e il timer settato.



Figura 5.15 Viscosimetro Engler livellato e timer

Il principio operativo si basa sulla misurazione del tempo necessario affinché 200 cm^3 di fluido attraversino il foro; tale valore viene poi confrontato con il tempo impiegato da un identico volume di acqua distillata a 20°C . Il risultato fornisce la viscosità cinematica del fluido, espressa in gradi Engler, secondo la formula:

$$^{\circ}E = \frac{\text{tempo di efflusso } 200 \text{ cm}^3 \text{ olio}}{\text{tempo di efflusso } 200 \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{O a } 20^{\circ}}$$

Con una certa approssimazione la misura in centistokes cst è ricavabile dividendo il valore ottenuto per 0,132. [24]

$$v(\text{cSt}) = \frac{v(^{\circ}E)}{0,132}$$

5.2.2 Misurazioni

Lo svolgimento delle prove avviene secondo questa procedura: dopo aver chiuso il foro con l'asta, si riempie il recipiente fino a un livello prestabilito, come si può notare in figura 5.16, e si imposta la temperatura desiderata tramite il termostato. Si attende quindi che il fluido raggiunga l'equilibrio termico con l'acqua riscaldata (operazione che richiede solitamente 20–30 minuti). Per evitare stratificazioni termiche si utilizza di tanto in tanto un agitatore.

Quando entrambi i termometri (posti a controllo del bagno e del fluido) segnano la medesima temperatura, si solleva l'asta e si cronometra il tempo necessario affinché la buretta si riempia fino a 200 cm^3 .



Figura 5.16 Riempimento del serbatoio con olio

Sebbene lo strumento sia concepito per monitorare anche la temperatura dell'acqua del bagno termostatico, in laboratorio il controllo è stato effettuato solo sulla temperatura dell'olio attendendo che quest' ultimo raggiungesse il valore target scelto per la prova. A questo scopo sono stati utilizzati due termometri immersi nell'olio, uno dei quali dotato di scala più ampia per una lettura nei range superiori. Tutta la strumentazione utilizzata è mostrata in figura 5.17.



Figura 5.17 Strumentazione utilizzata col viscosimetro Engler

È necessario eseguire almeno una misurazione con acqua distillata a 20 °C; data la rapidità del flusso in questo caso, è consigliabile ripetere più volte la prova per ottenere una media affidabile. Il valore medio rilevato per l'acqua è di 54,9 s.

5.2.3 Analisi Risultati

Successivamente, sono state condotte tre misurazioni alle seguenti temperature dell'olio: 32 °C, 42 °C e 60 °C. Come detto, la temperatura non è stata impostata direttamente sul termostato, ma

si è atteso che il termometro immerso nell'olio segnasse il valore prestabilito. I tempi di efflusso registrati sono riportati nella seguente tabella 5.1:

Temperatura [°C]	Tempo [min]	Tempo [s]	Tempo totale [s]	Viscosità [°Engler]	Viscosità [cSt]
32	8	46,73	526,72	9,59	72,7
42	6	43,89	403,89	7,36	55,7
60	4	20,24	260,24	4,74	35,9

Tabella 5.1 Tempi di efflusso e viscosità registrate

Nella figura 5.18 è riportato un esempio dei 3 tempi di efflusso registrati, in particolare quello relativo alla prova finale a 60°C



Figura 5.18 Tempo di efflusso registrato a 60°C

Per meglio visualizzare l'andamento della viscosità in funzione della temperatura, si riporta di seguito la figura 5.19 che rappresenta l'evoluzione dei valori ottenuti nelle prove sperimentali.

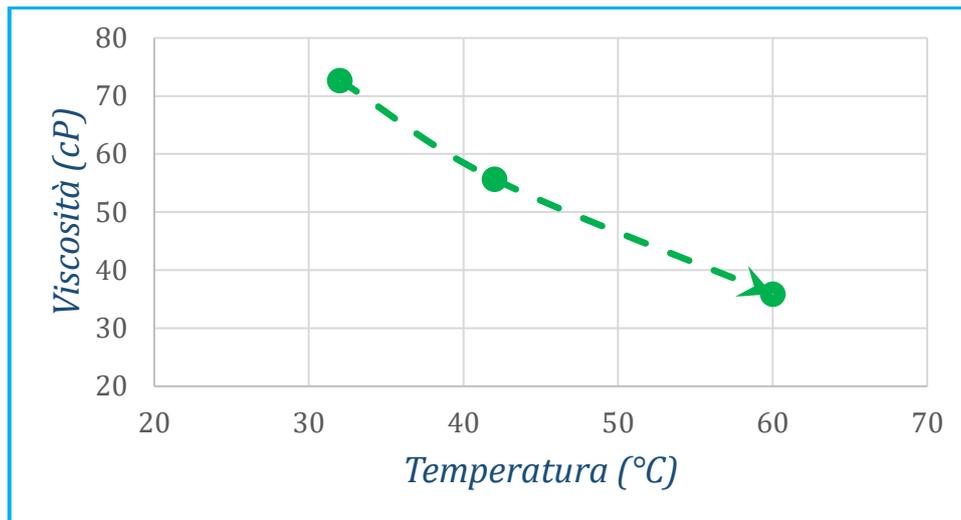


Figura 5.19 Curva viscosità- temperatura per viscosimetro Engler

Dal grafico risulta chiara la tendenza decrescente della viscosità all'aumentare della temperatura. Questo comportamento è coerente con quanto atteso per i fluidi: l'incremento della temperatura riduce le forze intermolecolari, facilitando il movimento delle molecole e quindi il deflusso del fluido. Di conseguenza, i tempi di efflusso si riducono e la viscosità cinematica diminuisce. Le misure ottenute confermano dunque il legame tra temperatura e viscosità.

5.3 Viscosimetro capillare

Il viscosimetro capillare è uno strumento di misura utilizzato per determinare con precisione la viscosità cinematica dei fluidi, grandezza fisica che rappresenta il rapporto tra la viscosità dinamica e la densità del fluido.

5.3.1 Funzionamento

Il principio di funzionamento si basa sulla misura del tempo impiegato da un volume noto di fluido che defluisce per gravità attraverso un tubo capillare di vetro, in condizioni di moto laminare. Questo metodo, noto anche come metodo viscometrico a tempo di efflusso, è stato formalizzato nella legge di Poiseuille, che descrive il comportamento dei fluidi newtoniani all'interno di condotti cilindrici e viene espressa dalla seguente formula:

$$q = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8l\eta}$$

Tale relazione stabilisce che la portata è direttamente proporzionale alla differenza di pressione Δp applicata agli estremi del tubo e al raggio R del condotto ed è inversamente proporzionale alla viscosità del fluido η e alla lunghezza del condotto l .

Lo strumento in analisi, è costituito da un tubo di vetro trasparente, calibrato e dotato di una serie di ampole, capillari e tacche di riferimento. Nella Figura 5.20 è mostrato il viscosimetro capillare disponibile in laboratorio, di tipo Ubbelohde, in cui sono evidenti le tacche di riferimento e la struttura in vetro calibrato.

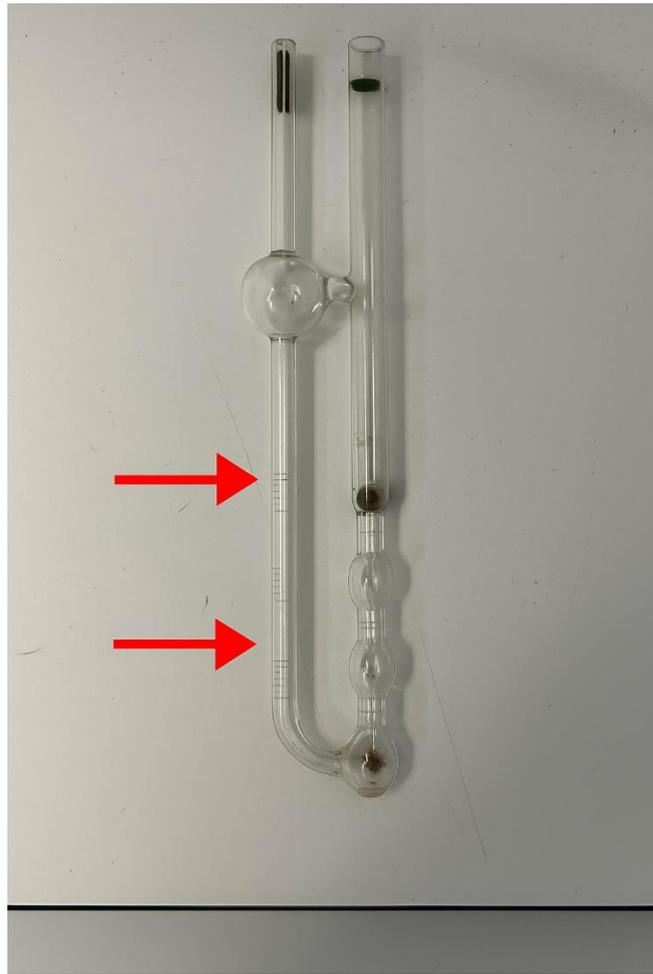


Figura 5.20 Viscosimetro capillare

Esistono diversi tipi di viscosimetri capillari che presentano geometrie leggermente differenti pensate per ottimizzare la misura in base alla viscosità del fluido e alla sua trasparenza. tra cui:

- Ubbelohde: a flusso diretto, adatto per liquidi trasparenti.
- Ostwald: simile all'Ubbelohde, ma con alcune differenze nella geometria.
- Cannon-Fenske: a flusso inverso, utilizzato per liquidi opachi.

Durante una tipica misura, il liquido viene introdotto nel tubo di destra, aspirato verso l'altro al di sopra della prima tacca, e lasciato defluire per effetto della sola forza gravitazionale. Il tubo di sinistra serve per stabilizzare il flusso e grazie al bulbo intermedio la pressione viene mantenuta costante.

L'operatore registra il tempo che il menisco del fluido impiega a passare tra due tacche di riferimento, in genere posizionate lungo il tratto rettilineo del tubo. La viscosità cinematica si ottiene moltiplicando il tempo di deflusso per una costante strumentale (K), espressa in mm^2/s^2 , che dipende dalla geometria e dimensione del viscosimetro. La relazione utilizzata è la seguente:

$$v = K \times t$$

dove:

- v è la viscosità cinematica (mm^2/s),
- K è la costante del viscosimetro (mm^2/s^2),
- t è il tempo di efflusso (s).

Affinché la misura sia affidabile, è essenziale che il fluido mantenga una temperatura costante, poiché la viscosità è fortemente dipendente da essa. Per questo motivo, il viscosimetro viene solitamente immerso in un bagno termostatico che garantisce condizioni stabili, in genere a $40\text{ }^\circ\text{C}$ o $100\text{ }^\circ\text{C}$, in conformità con le normative tecniche internazionali (come la ASTM D445 o la ISO 3104). Alcuni modelli moderni sono certificati e tarati con tracciabilità ai campioni primari, e possono includere una certificazione di calibrazione conforme agli standard ISO 17025.

I viscosimetri capillari vengono utilizzati prevalentemente in ambito industriale, petrolchimico, farmaceutico e alimentare, dove la determinazione precisa della viscosità è un parametro critico per il controllo qualità. Nonostante richiedano tempi di misura più lunghi rispetto ad altri dispositivi, come i viscosimetri rotazionali, essi offrono una notevole precisione e ripetibilità quando utilizzati correttamente grazie alla loro semplicità costruttiva e alla presenza di normative internazionali che ne regolano l'uso, come le norme ASTM D445 e ISO 3104. Inoltre è uno strumento economico e l'assenza di parti in movimento riduce i rischi di guasto e la necessità di manutenzione rendendo dunque il dispositivo affidabile nel tempo. Tuttavia, come già specificato, il suo utilizzo richiede condizioni operative molto controllate e inoltre, non è adatto a fluidi torbidi, contaminati o con comportamento non newtoniano, e risulta piuttosto lento e laborioso rispetto ad altri metodi più moderni. Per questi motivi, sebbene il viscosimetro capillare rimanga una soluzione valida in ambito laboratoristico, risulta meno pratico per analisi rapide o su larga scala.

Nel contesto del presente lavoro, non sono state condotte prove sperimentali con il viscosimetro capillare, ma si è comunque ritenuto utile includere una descrizione del suo principio di funzionamento e delle sue applicazioni. [25]

5.4 Densimetro a bilancia

Per la misurazione della densità dell'olio è stato utilizzato il densimetro di Mohr-Westphal, dotato di un sistema formato un'asta graduata, un corpo termometrico e pesi mobili, visibili in figura 5.21.



Figura 5.21 Strumentazione utilizzata col densimetro Mohr-Westphal

Come si può osservare, lo strumento presenta una configurazione semplice ma funzionale, che permette di effettuare misurazioni dirette della densità sfruttando il principio di Archimede in condizioni controllate.

5.4.1 Funzionamento

Lo strumento è costituito da un'asta mobile bilanciata in un punto centrale, su cui agiscono due forze: da un lato un contrappeso, e dall'altro un corpo termometrico immerso nel fluido da analizzare. In condizioni normali, cioè in aria, le due forze sono in equilibrio e l'asta risulta orizzontale. Quando il corpo viene immerso nel fluido, la spinta idrostatica ne modifica l'equilibrio, facendo abbassare il lato immerso. Per riportare l'asta in posizione orizzontale, si applicano pesi mobili detti cavalierini riferiti a diverse unità di misura (centinaia, decine, unità) su tacche numerate lungo il braccio, fino a ristabilire l'equilibrio. [24]

Come si osserva dalla figura 5.22, questa configurazione consente di monitorare con precisione la posizione dei pesi e di garantire il bilanciamento della leva durante l'immersione del corpo nel fluido alla temperatura desiderata.



Figura 5.22 Principio di funzionamento

5.4.2 Misurazioni

Le misure sono state effettuate progressivamente partendo da una misura iniziale e si sono successivamente spostati solo i pesi relativi alle decine e alle unità, ipotizzando variazioni contenute della densità tra una temperatura e l'altra.

Il controllo della temperatura è stato effettuato con attenzione: per ogni misura è stata impostata la temperatura desiderata dell'acqua nel bagno termostato (ad esempio 20 °C), attendendo che anche l'olio, monitorato tramite un termometro, raggiungesse effettivamente quella temperatura. In genere, la temperatura dell'acqua tendeva a stabilizzarsi prima di quella dell'olio, con una leggera differenza di 1–2 °C, che veniva compensata attendendo il completo equilibrio termico prima della misurazione. Per garantire misure accurate, si è aspettato quindi che anche l'olio fosse termicamente stabile prima di procedere alla rilevazione della misura di densità.

5.4.3 Analisi risultati

Sono state eseguite tre misurazioni a 20 °C, 40 °C e 60 °C, ottenendo rispettivamente i valori di 852 kg/m^3 , 850 kg/m^3 e 829 kg/m^3 . Nelle seguenti immagini, figura 5.23, figura 5.24, figura 5.25, si possono osservare le tre prove effettuate con i rispettivi valori di densità rilevati.

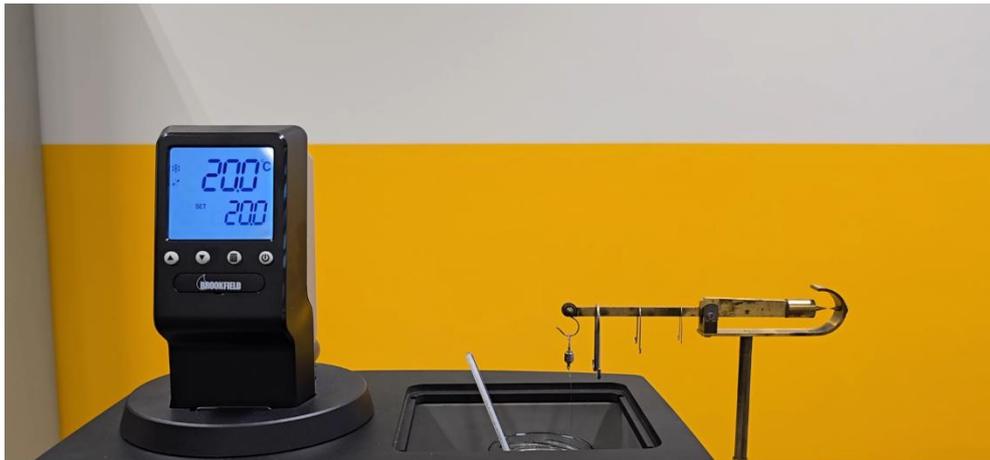


Figura 5.23 Misura della densità a 20°C

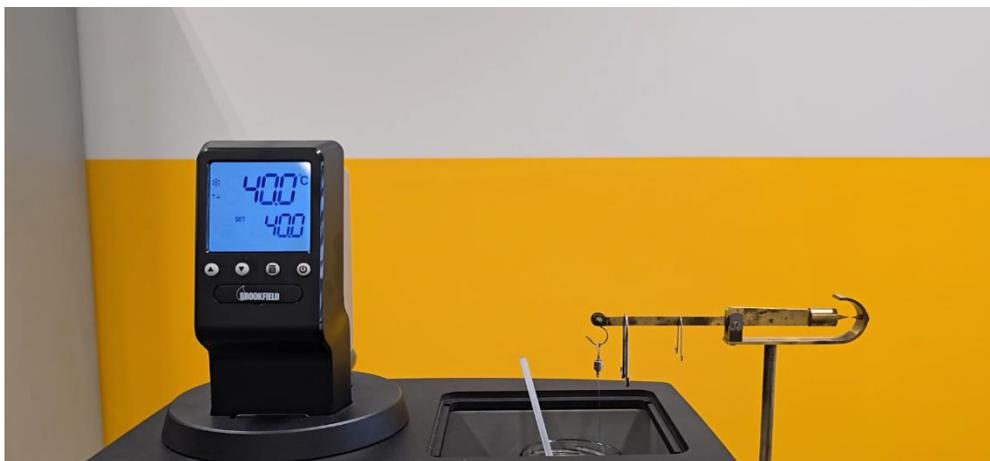


Figura 5.24 Misura della densità a 40 °C

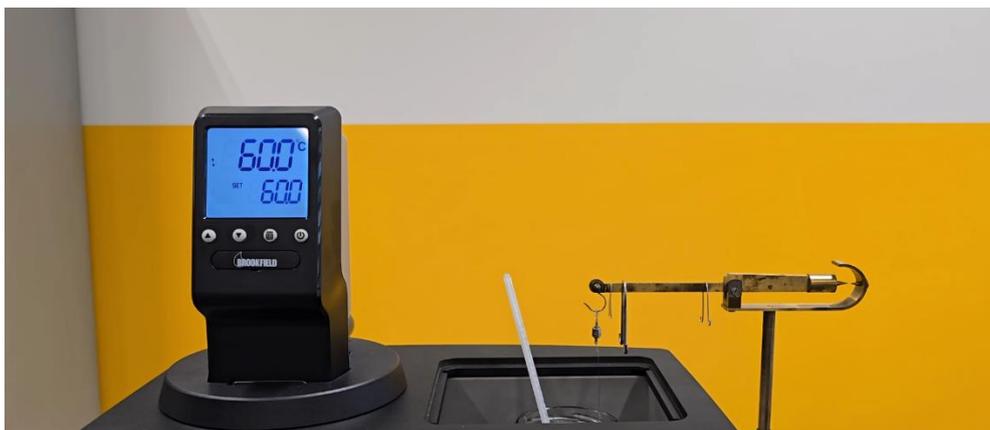


Figura 5.25 Misura della densità a 60 °C

Per visualizzare meglio l'andamento della densità in funzione della temperatura, si riporta di seguito il grafico (figura 5.26) che rappresenta l'evoluzione dei valori ottenuti nelle prove sperimentali.

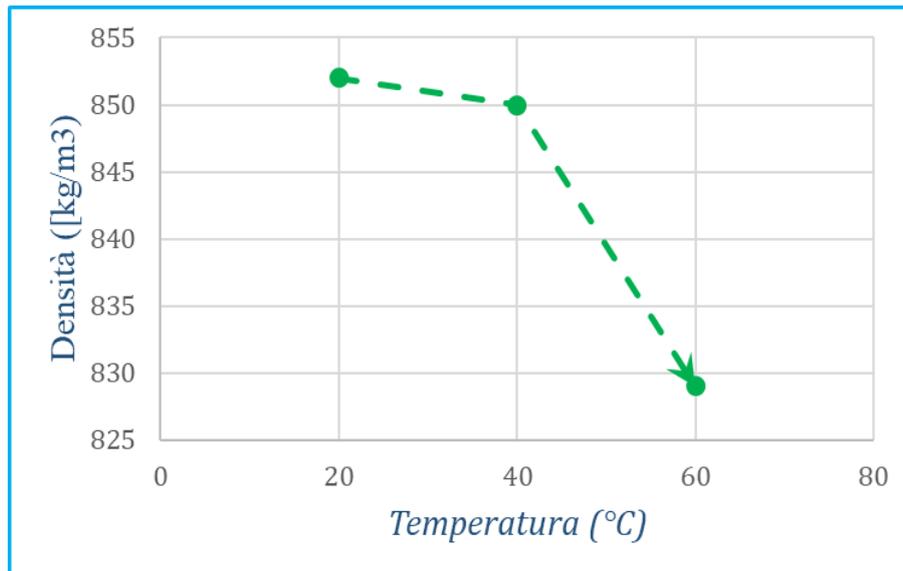


Figura 5.26 Curva densità- temperatura

La leggera ma progressiva diminuzione conferma il comportamento atteso: all'aumentare della temperatura, la densità dell'olio si riduce a causa dell'aumento di energia termica del fluido. Va inoltre considerato che, trattandosi di uno strumento meccanico manuale, l'accuratezza delle misure dipende fortemente dalla corretta regolazione dei ganci e dalla sensibilità dell'osservatore nel rilevare il perfetto equilibrio dell'asta. Questo introduce una possibile incertezza nella lettura, in particolare nei passaggi tra le unità e le decine.

5.5 Contatore di particelle

Nel corso dell'attività sperimentale svolta in laboratorio, è stato utilizzato il contatore portatile di particelle Pall PFC400W per analizzare il livello di contaminazione dello stesso olio utilizzato però in due differenti impianti. Lo strumento ha permesso di effettuare analisi rapide e mirate sullo stato del fluido.

5.5.1 Funzionamento

Il contatore portatile di particelle Pall PFC400W, rappresentato in figura 5.27, è progettato per misurare con precisione e in tempo reale il livello di contaminazione da particelle solide nei sistemi idraulici e di lubrificazione a ricircolo. Il dispositivo utilizza un laser ad alta precisione per contare le particelle sospese, senza dover prelevare dei campioni dall'esterno che potrebbero introdurre contaminanti. Lo strumento funziona con un sensore ottico che misura la luce laser attenuata dalle particelle che passano nel fluido e le classifica per dimensione. Può operare in modalità ad alta pressione (fino a 400 bar) o bassa pressione, è compatibile con diversi tipi di fluidi (oli minerali, sintetici, esteri fosfatici industriali). I dati registrati delle analisi vengono poi trasferiti ad un PC tramite porta RS232, consentendo analisi statistiche e di trend. Inoltre, grazie alla presenza di un'interfaccia a menu guidato e alla possibilità di definire profili personalizzati, risulta facile l'utilizzo di questo strumento anche in contesti industriali complessi. [26] Nella figura 5.28 viene mostrato uno zoom del display.

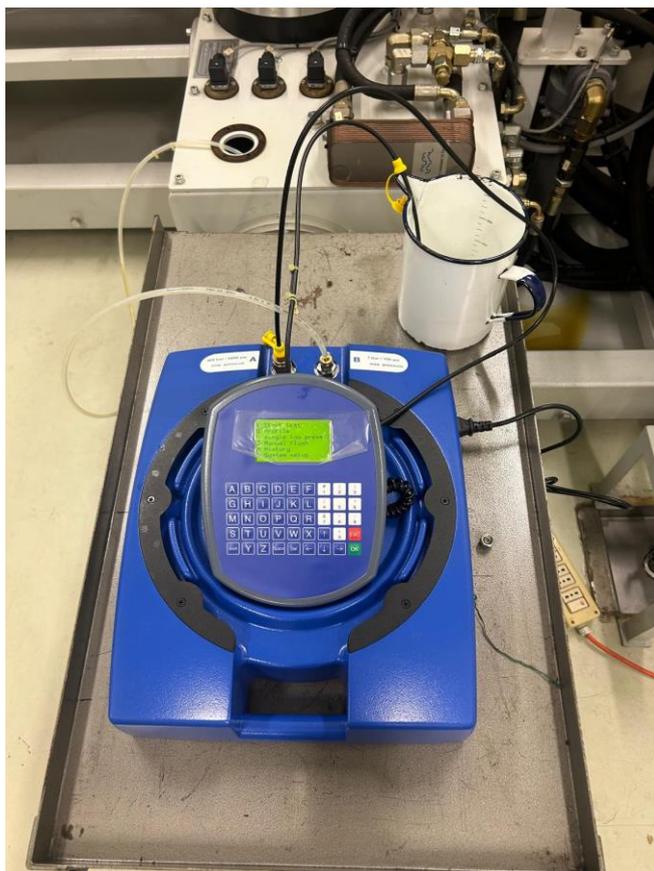


Figura 5.27 Contatore di particelle Pall



Figura 5.28 Zoom del display del contatore di particelle Pall

Durante l'analisi, il display del PFC400W mostra in tempo reale una serie di informazioni fondamentali per il monitoraggio e la validazione della misura. Tra queste compaiono: la data e

ora corrente, il nome del profilo selezionato, il numero della prova in corso rispetto al totale previsto (es. “Run 2/3”), l’identificativo del campione, e lo stato del test (es. “Counting”). Vengono inoltre visualizzati gli allarmi attivi, la concentrazione d’acqua, la classe di contaminazione secondo lo standard scelto, la temperatura del fluido, e due timer: uno relativo al tempo rimanente per la singola fase di misura e uno per l’intero ciclo di test. Al termine dell’analisi, sullo schermo viene mostrato un riepilogo con i risultati medi e gli eventuali allarmi, consentendo all’operatore di visualizzare immediatamente l’esito del test e, se necessario, procedere con la stampa o l’esportazione dei dati.

Il parametro più importante da analizzare è la classe di contaminazione, che può essere espressa secondo diversi standard internazionali (ISO 4406, NAS 1638, SAE AS4059, DEF STAN 05-42). Nel nostro caso, si sono visualizzate le letture secondo la norma ISO 4406 che esprime i risultati attraverso un codice formato da tre numeri (ad esempio 20/18/15). Ogni numero indica rispettivamente il numero di particelle maggiori di 4,6 e 14 $\mu m(c)$ presenti in 1 millimetro di fluido. Inoltre ogni valore rappresenta una classe su scala logaritmica: un incremento di una classe significa che il numero di particelle per quella dimensione è raddoppiato. Questo sistema consente di valutare in modo immediato il livello di pulizia del fluido per capire se questo rispetta i limiti richiesti. [27]

Oltre al livello di contaminazione, si misura anche il contenuto d’acqua disciolta nel fluido, espresso come percentuale di saturazione (%SAT). Questo valore indica il rapporto tra la quantità attuale di acqua presente e la massima quantità che il fluido può contenere in forma disciolta a una data temperatura. Una saturazione del 100% rappresenta il punto oltre il quale si ha formazione di acqua libera (condensazione), condizione critica per la maggior parte dei sistemi idraulici. Valori elevati di saturazione possono accelerare l’ossidazione del fluido e causare corrosione dei componenti interni. Sebbene il PFC400W consenta la lettura anche in *ppm* (parti per milione), in questo caso le analisi sono state condotte utilizzando la modalità standard in %SAT, per una valutazione rapida del rischio di contaminazione da umidità.

5.5.2 Misurazioni

Prima di effettuare le misure vere e proprie, attraverso la funzione “Manual Flush” visibile in figura 5.29, è stato eseguito un flussaggio del sistema. Questa operazione è fondamentale per eliminare eventuali bolle d’aria e residui di fluidi precedenti, per poter ottenere risultati veritieri e affidabili. Il dispositivo consente di selezionare il tipo di flussaggio, scegliendo tra le modalità a bassa o alta pressione, a seconda del tipo di connessione utilizzata. Nel nostro caso è stata scelta la modalità “single low pressure” Una volta completato il flussaggio, è stato avviato il test vero e proprio.



Figura 5.29 Fase di flussaggio

Sono state effettuate due misurazioni utilizzando lo stesso tipo di olio ma prelevato da due impianti differenti, al fine di confrontare le condizioni operative e verificare eventuali differenze nella contaminazione tra i due circuiti. I risultati sono stati registrati e verranno analizzati e commentati successivamente, supportati dalla documentazione fotografica acquisita durante le prove. Si riportano in figura 5.30 e figura 5.31 solo i risultati finali riferiti alla media dei tre test effettuati.



Figura 5.30 Risultato finale del primo impianto



Figura 5.31 Risultato finale del secondo impianto

5.5.3 Analisi e confronto risultati

I risultati ottenuti mostrano delle lievi differenze tra i due impianti analizzati, pur utilizzando lo stesso tipo di olio. Nel primo impianto, la classe di contaminazione rilevata è 15/14/10, accompagnata da una percentuale di saturazione dell'acqua del 42%, mentre nel secondo impianto si è registrata una classe leggermente più elevata (17/13/9) ma con un valore di saturazione inferiore, pari al 28%.

Secondo le linee guida ISO 4406, la classe di pulizia da non superare è, per i sistemi idraulici, di 15/13/10. Entrambi i campioni analizzati rispettano sommariamente questo standard: l'impianto 1 infatti rientra pienamente nel valore limite, mentre l'impianto 2 sfiora leggermente nel numero di particelle $>4 \mu m$. Per quanto riguarda la saturazione dell'acqua, i valori considerati accettabili sono quelli inferiori al 40-50%. L'impianto 2, con una saturazione del 28%, rimane abbastanza al di sotto del limite consigliato, mentre l'impianto 1, con il 42%, si avvicina di più alla soglia pur non superandola. Nel complesso, entrambi gli impianti non presentano problematiche particolari ma mostrano delle leggere differenze. L'impianto 1 presenta un livello di contaminazione leggermente inferiore ma una saturazione d'acqua più elevata, mentre l'impianto 2 contiene meno acqua ma ha un contenuto di particelle leggermente più alto. Queste differenze potrebbero derivare da variabili operative o di manutenzione specifiche per ciascun impianto.

Si consiglia di monitorare regolarmente entrambi i parametri per garantire condizioni ottimali del fluido e prevenire potenziali problemi nel sistema idraulico.

6. Conclusione

Il lavoro di tesi svolto ha permesso di analizzare in modo approfondito le proprietà fisiche e chimiche dei fluidi oleodinamici soffermandosi sui fenomeni legati alla contaminazione e alle tecniche usate per misurarla e di conseguenza prevenirla.

La parte sperimentale, in particolare, ha confermato quanto è importante monitorare costantemente e correttamente i parametri di viscosità, densità e livello di contaminazione. I risultati ottenuti dai test condotti in laboratorio sono serviti a confermare i comportamenti attesi e anche ad evidenziare differenze tra fluidi appartenenti a impianti diversi.

Analizzando la contaminazione si è potuto dedurre quanto sia fondamentale adottare delle strategie adatte per misurarla e soprattutto prevenirla. Questo è possibile impiegando le tecniche di filtrazione corrette e adeguate al sistema in analisi, progettando correttamente il circuito. È necessario anche fare attenzione alla manutenzione e all'uso di strumenti di controllo efficienti, per poter garantire un livello ottimo di pulizia e affidabilità.

Inoltre, confrontando le diverse tipologie di fluidi idraulici, è chiaro come anche la scelta di quest'ultimo risulti una fase cruciale. Ogni fluido infatti presenta dei vantaggi e dei limiti in base all'impianto, quindi è fondamentale considerare le condizioni operative e gli aspetti normativi, ambientali e di compatibilità con i materiali del sistema.

In conclusione, il lavoro evidenzia come impiegare strumenti di misura precisi e affidabili in laboratorio sia fondamentale per il monitoraggio continuo e accurato dei fluidi oleodinamici. È importante infatti sceglierli e calibrarli correttamente per ottenere dati utili a valutare la qualità del fluido al fine di prevenire il più possibile la contaminazione e ottimizzare le strategie di manutenzione.

Bibliografia

- [1] F. Giovanni, *L'oleoidraulica nell'ambito industriale e mobile*, Milano: Assofluid, 2004.
- [2] W. contributors, «Coefficiente di espansione termica,» [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Coefficiente_di_dilatazione_termica.
- [3] U. filters, «Filtrazione dei fluidi in emulsione olio-acqua,» 2022. [Online]. Available: <https://www.ufihyd.com/it/blog/filtrazione-dei-fluidi-in-emulsione-olio-acqua/>.
- [4] Nils, «Lubrificanti biodegradabili: classificazione, normative e certificazioni,» [Online]. Available: <https://www.nils.eu/lubrificanti-biodegradabili-classificazione-normative-e-certificazioni/#:~:text=Normativa%20e%20classificazione%20degli%20oli,dal%20punto%20di%20vista%20ambientale>.
- [5] Modofluido, «Fluido idraulico: guida ai tipi di contaminanti e ai danni correlati,» 2020. [Online]. Available: <https://modofluido.hydac.it/fluido-idraulico-contaminanti-danni>.
- [6] Atos, «Contaminazione del fluido,» [Online]. Available: <https://www.atos.com/tables/italian/LF010.pdf>.
- [7] Mecoil, «Contaminazione del Lubrificante,» 2025. [Online]. Available: <https://www.mecoil.net/2025/05/22/contaminazione-del-lubrificante/>.
- [8] H. Filter, «Contaminazione dei fluidi: cause, pericoli e soluzioni efficaci,» 2025. [Online]. Available: <https://hifi-filter.com/it/contaminazione-dei-fluidi-cause-pericoli-e-soluzioni-efficaci/>.
- [9] Modofluido, «ISO 4406, NAS 1638, SAE AS 4059: classificazioni di contaminazione del fluido idraulico,» 2024. [Online]. Available: <https://modofluido.hydac.it/classificazione-olio-idraulico>.
- [10] Metrohm, «Determinazione del TBN nei lubrificanti,» 2021. [Online]. Available: https://www.metrohm.com/it_it/applications/application-notes/nahinfrarotspektroskopieannir/an-nir-097.html.
- [11] Metrohm, «Numero di acidità totale con la titolazione conduttimetrica,» [Online]. Available: https://www.metrohm.com/it_it/applications/application-notes/aa-t-001-100/an-t-240.html#:~:text=Il%20numero%20di%20acidit%C3%A0%20totale,neutralizzare%20un%20grammo%20di%20campione.

- [12] Metrohm, «ASTM D6304: Determinazione più semplice dell'umidità nei prodotti petroliferi,» 2021. [Online]. Available: https://www.metrohm.com/it_it/discover/blog/20-21/-astm-d6304--easier-determination-of-moisture-in-petroleum-produ.html.
- [13] Scharlab, «Valutazione del contenuto d'acqua per Karl-Fischer,» 2023. [Online]. Available: <https://www.scharlab.com/lab/it/it/risorse/blog/valutazione-contenuto-dacqua-karl-fischer/#:~:text=La%20valutazione%20del%20contenuto%20d,quantit%C3%A0%20di%20acqua%20nel%20campione.>
- [14] M. Toledo, «Che cos'è la titolazione Karl Fischer?,» [Online]. Available: https://www.mt.com/ch/it/home/applications/Application_Browse_Laboratory_Analytics/Application_fam_browse_main/kf-titration-principle.html.
- [15] Savant, «Air Separation - The Key Performance Indicator,» [Online]. Available: <https://www.savantlab.com/testing-highlights/air-separation-astm-d3427-air-release-testing/>.
- [16] H. electric, «Cos'è l'analisi dei gas disciolti,» 2024. [Online]. Available: <https://it.sinohipot.com/info/what-is-the-dissolved-gas-analysis-96855404.html>.
- [17] U. filters, «Ottimizzare l'impianto oleodinamico: una guida ai materiali filtranti,» 2024. [Online]. Available: <https://www.ufihyd.com/it/blog/ottimizzare-limpianto-oleodinamico-una-guida-ai-materiali-filtranti/>.
- [18] F. Technik, «What is Dirt-Holding Capacity and why is it so important?,» [Online]. Available: <https://www.filtertechnik.co.uk/news/what-is-dirt-holding-capacity-and-why-is-it-so-important?>.
- [19] ISO, «ISO 2941:2009,» 2009. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/41062.html>.
- [20] Mpfiltri, «Hydraulic Filtration Knowledge,» [Online]. Available: https://www.mpfiltri.it/knowledge-centre/hydraulic_filtration_knowledge/.
- [21] I. O. f. Standardization, «ISO 2943: Hydraulic fluid power — Filter elements — Verification of collapse/burst resistance,» 1998. [Online]. Available: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/26832/7d83a582ee2142aa812f4c2e83c8d267/ISO-2943-1998.pdf>.
- [22] Rfsolutions, «Filtrazione di profondità vs filtrazione di superficie: quale scegliere per i processi alimentari e industriali?,» 2025. [Online]. Available: <https://www.rfsolutions.it/blog/filtrazione-di-profondita-vs-filtrazione-di-superficie/>.
- [23] Sepra, «Filtrazione Magnetica per Olio,» 2022. [Online]. Available: <https://www.sepra.it/it/filtrazione-magnetica-per-olio-p-76.html>.
- [24] N. N. Massimo Rundo, Passi nell'oleodinamica volume 1, Epics, 2020.

- [25] Geass, «Viscosimetri a capillare,» 2023. [Online]. Available: <https://viscosimetri.it/viscosimetri-a-capillare/>.
- [26] P. Corporation, «PFC400W User Manual Issue,» 2003.
- [27] Donaldson, «Comprensione dei codici di pulizia ISO,» [Online]. Available: <https://www.donaldson.com/it-it/engine/filters/technical-articles/understanding-iso-cleanliness-codes/>.

