

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA
SCUOLA POLITECNICA



TESI DI LAUREA IN
INGEGNERIA MECCANICA

**Studio e preparazione di superfici LIS per la riduzione
dell'attrito idrodinamico in ambito navale**

Relatore:

Chiar.^{mo} Prof. Ing. Bottaro

Correlatore:

Dott. Ing. Alberto Lagazzo

Allievo: Pietro Benincasa

Ottobre 2017

Studio e preparazione di superfici LIS per la riduzione dell'attrito idrodinamico in ambito navale

Sommario

L'oggetto della tesi, nato dalla collaborazione dell'Università di Genova con il gruppo Fincantieri s.p.a. e Cetena s.p.a., consiste nello studio della riduzione delle forze d'attrito idrodinamico attraverso l'utilizzo di particolari superfici idrofobiche denominate L.I.S. (Lubrificant Impregnated Surfaces). Quest'ultime, invece che trattenere l'aria come nelle normali superfici idrofobiche, hanno una conformazione tale da intrappolare un olio lubrificante e quindi risultano essere più efficaci. Per verificarne la funzionalità sono state eseguite delle prove al reometro di vari provini rivestiti con diverse tipologie di LIS, ottenute da un supporto di PDMS, o di silicone, opportunamente preparato in modo creare una microstruttura atta ad accogliere il liquido impregnante (siliconico, vaselina). Si è adottata la tipologia di prova del disco immerso a frizione, per cui esistono diverse soluzioni analitiche e numeriche, e si sono infine normalizzati i parametri in modo da poter confrontare i risultati. Si sono intraviste le possibilità di realizzare superfici realmente efficaci per lo scopo dell'ottimizzazione energetica.

Study and preparation of LIS surfaces for ship drag reduction in naval application

Abstract

The object of the thesis, stemming from a collaboration among the University of Genoa with the group Fincantieri s. p. a. and Cetena s. p. a., consists in the study of the reduction of the frictional forces through the utilisation of particular hydrophobic surfaces named L.I.S. (Lubricant Impregnated Surfaces). This last, instead of maintaining an air plastron as in hydrophobic surfaces, have the capacity to trap a lubricating oil near the wall and, as such, turn out to be more effective. To verify the functionality of LIS test have been carried out on a rheometer, by evaluating several samples covered with different types of LIS, obtained by a support of PDMS or silicone, conveniently prepared so as to create a microstructure able to receive the lubricant (silicon, vaseline).

The possibilities have been glimpsed of realising surfaces really effective for the energy optimisation.

Indice

Sommario	I
Abstract	II
1 - Introduzione	1
2 – Stato dell’arte	2
2.1 - Forze di resistenza.....	2
2.1.1 - Coefficiente di resistenza totale	3
2.2 - Riduzione coefficiente d’attrito	7
3 – Superfici super idrofobiche	10
3.1 - Vernici anti-fouling	10
3.1.1 - Lis	11
3.1.2 - Fenomeni di scorrimento nei fluidi	14
4 – Materiali e metodi	16
4.1 – Preparazione del materiale	16
4.1.1 – Stampo da carta vetro.....	16
4.1.2 – Preparazione del supporto mediante l’utilizzo di un porogeno	17
4.2 – Metodi sperimentali per le proprietà anti-attrito	18
4.2.1 – Misurazione bagnabilità e angolo di tilt.....	18
4.2.2 – Misure reometriche	22
4.2.2.1 – Strumento e metodologie di prova	23
5 - Risultati	27
5.1 – Normalizzazione dati.....	27
5.2 – Misure reometriche	30
6 - Conclusioni	34
Bibliografia	35
Simbologia	36

1-Introduzione

Uno degli aspetti fondamentali nella navigazione marina è la riduzione dell'attrito tra lo scafo di una nave e l'acqua con cui entra in contatto. Ridurre questa forza consentirebbe una maggior efficienza energetica con conseguenze positive sui consumi e quindi sui costi di trasporto, sulla velocità di crociera della nave stessa e sulla diminuzione delle sostanze inquinanti. I materiali utilizzati per rivestire le superfici immerse contribuiscono in maniera significativa al raggiungimento di tale obiettivo, in aggiunta all'ottimizzazione della forma dello scafo.

Da qui nasce una collaborazione tra gruppo Fincantieri s.p.a., Cetena s.p.a., e la Scuola Politecnica dell'Università degli Studi di Genova per poter sviluppare nuove tecnologie che permettano di migliorare la navigazione.

Le proprietà che influenzano maggiormente le condizioni di navigazione di una nave sono due:

- Le proprietà anti-fouling dello scafo
- Il basso coefficiente d'attrito delle carene

Nel mio elaborato ho esaminato un rivestimento particolare denominato LIS (Liquid Infused Surface), da posizionare al di sopra delle vernici anti-fouling già usate da Fincantieri per le sue navi, costituita da uno strato di PDMS (o da una gomma siliconica) e un olio siliconico in modo tale da ottenere un'elevata idrofobicità così da ridurre gli attriti.

In laboratorio abbiamo creato diverse superfici LIS ed effettuato vari test a reometro, misure di bagnabilità e di resistenza all'attrito in modo da poterne valutare potenziali applicazioni in ambito navale.

2-Stato dell'arte

2.1 Forze di resistenza

La resistenza fluidodinamica è quella forza che si oppone al movimento di un corpo in un fluido, in particolare in un liquido o in un aeriforme. In riferimento al moto nei liquidi è anche detta resistenza idrodinamica.

Un corpo che si muove in un fluido scambia con esso delle forze dovute alla viscosità di quest'ultimo. La resistenza di attrito è la componente della risultante di queste forze nella direzione del vettore velocità del corpo e nel verso contrario.

Nel caso delle navi, si definisce resistenza al moto, o resistenza totale, R_t , di una carena ad una data velocità V , la forza che sarebbe necessaria per rimorchiare, in acqua tranquilla e indisturbata, quella nave a quella data velocità. Questa definizione si riferisce ad una condizione teorica in quanto in pratica, supponendo anche di poter disporre di un rimorchiatore di potenza sufficiente, la nave rimorchiata avanzerebbe nella scia del rimorchiatore e quindi in acque disturbate.

Utilizzando la notazione adimensionale si può definire un coefficiente di resistenza totale C_t nella maniera seguente:

$$C_t = \frac{R_t}{\frac{1}{2}\rho S V^2} \quad (1)$$

ove S e V indicano rispettivamente, la superficie bagnata e la velocità della nave, mentre con ρ si individua la densità del fluido.

La potenza necessaria a vincere questa resistenza prende il nome di potenza effettiva o potenza di rimorchio e si indica con il simbolo P_E ; essa è data dal prodotto della resistenza totale per la velocità:

$$P_E = R_t v$$

Adesso analizziamo la resistenza totale. Essa è composta da un certo numero di componenti che sono dovute ad una molteplicità di cause e che interagiscono tra di loro in modo complesso. In prima approssimazione si può ritenere che la resistenza totale sia dovuta a tre componenti principali:

1. Resistenza d'attrito (frictional resistance, R_F), che, come suggerisce il nome, nasce dalle forze d'attrito originate dal flusso d'acqua agente lungo la superficie dello scafo. Essa è funzione della superficie bagnata (cioè esposta al fluido), della velocità e della viscosità del fluido. Rappresenta dal 70 al 90% della resistenza totale per navi a bassa velocità (portarinfuse e petroliere) e meno del 40% per navi ad alta velocità (navi portacontainer e navi passeggeri).

2. Resistenza residua (R_R) che, dovuta principalmente alla forma dello scafo, di norma rappresenta il 10-25% della resistenza totale per le navi a bassa velocità e tra il 40 e il 60 % per le navi ad alta velocità. A sua volta può essere divisa in:

- *resistenza d'onda* (wave making-resistance, R_W), dovuta all'energia che la nave deve spendere per la creazione di un campo ondoso causato del moto relativo tra fluidi ed il corpo;
- *resistenza di pressione viscosa* o “di scia” (viscous pressure resistance, R_V), dovuta all'energia che la nave perde per la formazione di vortici che si staccano dalla carena o dalle appendici;

3. Resistenza dell'aria (air resistance, R_A), dovuta alla velocità relativa tra la parte emersa della nave e l'aria ferma, cioè in assenza di vento. La resistenza dell'aria rappresenta circa il 2% della resistenza totale per questo motivo viene ritenuta trascurabile nella maggior parte dei casi. Si tenga comunque presente che nel caso di navi caricate con container che navigano in condizioni di vento contrario tale valore può salire fino oltre al 10%.

Riportando lo stesso concetto in termini matematici la resistenza totale può quindi essere scritta come:

$$R_T = R_F + R_R + R_A = R_F + R_W + R_V + R_A \quad (2)$$

L'importanza relativa tra le diverse componenti della resistenza dipende dal tipo di imbarcazione che si considera e dalla sua velocità. Le componenti della resistenza sopra descritte sono dette “principali” in quanto sono state le prime ad essere studiate e sono presenti in tutti i tipi di imbarcazione.

Tra le componenti di resistenza si annovera inoltre la resistenza delle appendici; le appendici di carena sono costituite da timoni, alette di rollio, assi portaelica e quant'altro sporga dalla carena. Questa componente della resistenza viene studiata separatamente in quanto le carene non vengono provate con le appendici ma nude.

2.1.1 Coefficiente di resistenza totale

Come già specificato, l'importanza relativa tra le diverse componenti della resistenza dipende molto dal tipo di imbarcazione tuttavia, poiché nella maggior parte dei casi si trascura il contributo della resistenza all'aria, l'espressione (2) diventa:

$$R_T = R_F + R_R$$

Dato che il coefficiente di resistenza totale scritto nella forma (1) dipende dalla resistenza totale, e quest'ultima dipende dalla resistenza residua e dalla resistenza d'attrito, il coefficiente di resistenza totale dipenderà dai due numeri adimensionali che descrivono le rispettive resistenze: Reynolds e Froude. [1]

$$C_T = C_T [Re, Fr]$$

Resistenza d'attrito

La resistenza d'attrito dà luogo alla formazione di uno strato d'acqua, che diviene più spesso andando da prora a poppa, nel quale la velocità varia passando dal valore pari a quello della carena in movimento, nelle immediate vicinanze della stessa, fino a un valore quasi nullo via via che ci si allontana da essa. Questa zona di acqua prende il nome di strato limite e la resistenza d'attrito è funzione della quantità di moto che la carena fornisce allo strato limite per mantenerlo in movimento.

Quindi, con il termine strato limite si intende quella regione del campo di moto dove si risente degli effetti dovuti alla presenza del solido, avendosi al suo interno variazioni di velocità rispetto ai valori di flusso indisturbato pari al 99%; questa è infatti la definizione usata per tracciare δ , spessore dello strato limite (vedi schizzo in *figura 1*)

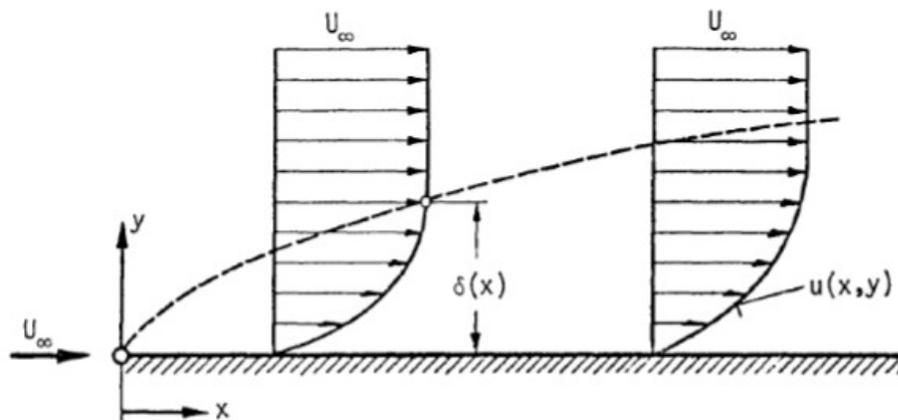


Figura 1- Andamento spessore dello strato limite

Gli studi più importanti sulla resistenza d'attrito furono condotti da Reynolds, che condusse esperienze sul flusso all'interno di tubi introducendo al centro della corrente, una sottile vena di colorante.

A bassi valori del numero di Reynolds, quando il filamento di colorante è stabile, il fluido si muove per strati paralleli che non si mescolano trasversalmente, ma scorrono l'uno sull'altro a differenti velocità; questo tipo di flusso viene chiamato laminare ed è associato a resistenze relativamente basse. All'aumentare del numero di Re il flusso laminare diviene sempre più instabile, fino a che non si verifica il mescolamento trasversale degli strati e la generazione di vortici e contemporaneamente si verifica un aumento della resistenza d'attrito R_F ; questo viene chiamato flusso turbolento.

Quindi la resistenza d'attrito dipende dal numero di Re:

$$R_F = f(\text{Re}), \quad \text{Re} = \frac{VL}{\nu}$$

In *figura 2* sono riportati i grafici del coefficiente di resistenza d'attrito in funzione del numero di Re, sia per il regime laminare che quello turbolento.

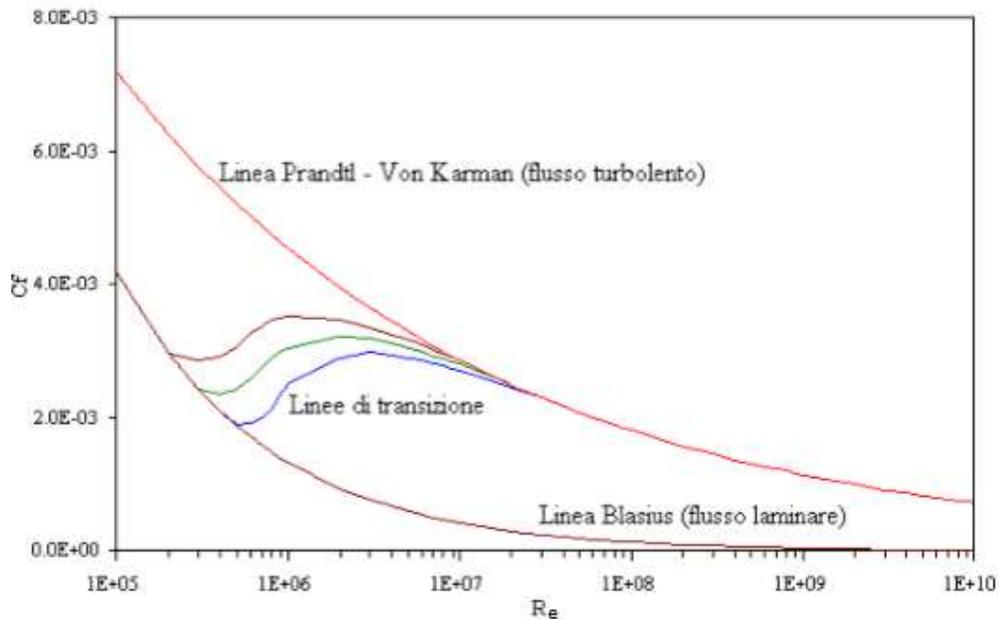


Figura 2- Linee d'attrito

Allo scopo di adottare una notazione adimensionale la resistenza d'attrito R_F viene espressa nella forma:

$$C_F = \frac{R_F}{\frac{1}{2} \rho S^2}$$

che prende il nome di coefficiente di resistenza d'attrito.

Resistenza residua

Come abbiamo già visto la resistenza residua si divide in resistenza d'onda e resistenza di pressione viscosa.

La resistenza d'onda è generata dalla formazione delle onde dovute alla perturbazione provocata dal passaggio della carena. L'altezza delle onde che accompagnano una carena dipende dalla velocità della stessa; infatti se la carena si muove a velocità molto bassa le onde che essa genera sono di entità trascurabile, e all'aumentare della velocità le onde divengono via via più appariscenti. Quindi per studiare il fenomeno risulta utile introdurre il concetto di velocità relativa, un parametro che lega la velocità ad una dimensione geometrica che rappresenta la grandezza della carena, come variabile da cui dipende la formazione ondosa di una carena. Viene introdotto il numero di Froude, grandezza adimensionale, che

può essere usato vantaggiosamente per esprimere la dipendenza funzionale della resistenza residua. Esso è definito da:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

con g l'accelerazione di gravità responsabile della formazione del campo ondoso, ed L la lunghezza di galleggiamento dello scafo. Questo numero è utile quindi per determinare la resistenza di forma di navi aventi diverse lunghezze e velocità: alti valori di Fr si traducono in grandi valori di resistenza di forma.

In *figura 3* è riportato un grafico del coefficiente di resistenza totale in funzione del numero di Froude (andamento qualitativo)

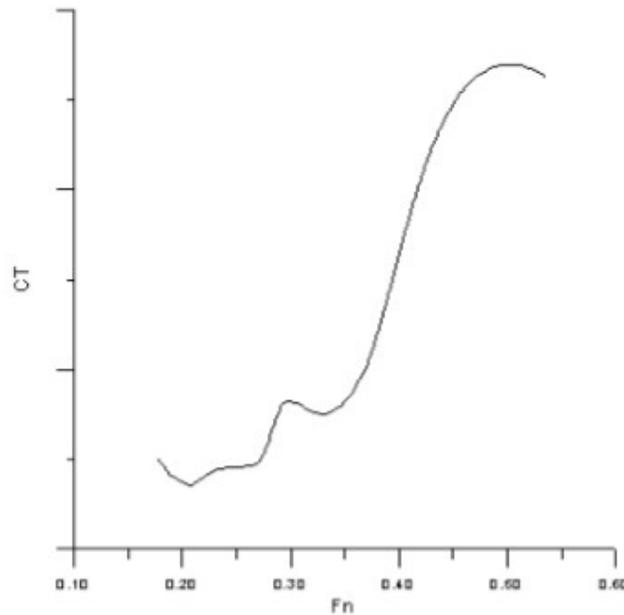


Figura 3- Coefficiente di resistenza totale in funzione di Froude

In conclusione si può affermare che la resistenza d'onda, per una data carena, dipende dalla velocità relativa, o meglio, dal numero di Froude, e espressa in forma adimensionale è:

$$C_w = \frac{R_w}{\frac{1}{2}\rho S V^2}$$

Per quanto riguarda la resistenza di pressione, essa dipende sia dal numero di Froude sia dal numero di Re, ed è dovuta alla produzione di vortici sul retro dello scafo di navigazione.
[2]

2.2 Riduzione coefficiente d'attrito

Come già anticipato la resistenza d'attrito dà luogo alla formazione di uno strato d'acqua, che comincia sottilissimo a prua e si allarga, a poco a poco, verso poppa, nel quale la velocità varia passando dal valore pari a quello della carena in movimento, nelle immediate vicinanze della stessa, fino ad un valore quasi nullo via via che ci si allontana da essa. Questa zona di acqua prende il nome di strato limite e la resistenza d'attrito dipende dalla quantità di moto che la carena fornisce allo strato limite per mantenerlo in movimento. Seguendo da prua a poppa lo strato limite notiamo che il flusso è:

- di tipo laminare in prossimità della prua, si tratta di una zona dove lo strato limite è molto ridotto e caratterizza uno spazio molto piccolo
- ad una piccola distanza dalla prua, nella cosiddetta zona di transizione la regolarità del flusso si interrompe ed iniziano i movimenti vorticosi. Lo strato limite diventa in linea di massima turbolento; tuttavia un sottilissimo strato viscoso permane vicino alla superficie dello scafo (non interessato dalle turbolenze circostanti)
- in prossimità della poppa, dove lo scafo si restringe più o meno bruscamente, il flusso non riesce più a seguire la curvatura della carena e si distacca. Si creano dei vortici più grandi in cui il flusso principale della corrente può anche avere direzione opposta al moto della barca: è questa la zona di separazione.

È chiaro che per ridurre il coefficiente di attrito si deve cercare di mantenere un flusso laminare laddove possibile e per farlo i parametri su cui poter intervenire sono: la geometria della nave, il sistema motore e le condizioni alla superficie di interfaccia (che sono correlate al tipo di vernice adottato). Tuttavia mentre nel caso di navi di costruzione attuale o futura, tutti e tre i parametri possono e devono essere considerati per ridurre il consumo di combustibile, quando si tratta di navi già esistenti, il sistema di rivestimento dello scafo è l'unico fattore su cui si possa operare effettivamente per migliorare il rendimento, dal momento che la geometria e l'impianto propulsivo possono raramente essere modificati, una volta costruita la nave.

Per questo motivo, l'unico modo per ottimizzare il consumo di combustibile è quello di ridurre l'attrito viscoso, a sua volta dipendente dalle seguenti grandezze:

- Velocità
- Parametri legati all'acqua di mare (temperatura, salinità, etc.)
- Parametri ambientali-climatici (ventosità, onde, correnti)

- Condizioni del rivestimento superficiale (presenza del bio-fouling, scabrezza microgeometrica, corrosione meccanica, ecc).

Per le prime tre voci dell'elenco sono pochi gli accorgimenti che si possono prendere al riguardo in fase progettuale.

La velocità ha una forte influenza sulla potenza motrice della nave; tuttavia come detto prima spesso non può essere soggetta a modifiche dovendo la nave rispondere a tempistiche di viaggio ben precise.

Per quanto riguarda la temperatura, le condizioni dell'acqua di mare, e le condizioni ambientali climatiche, esse non vengono prese in considerazione visto che sono variabili con le rotte e non si può utilizzare un approccio sistematico per analizzare il contributo che forniscono.

La caratteristica su cui si può agire più liberamente è quindi la condizione del rivestimento applicato allo scafo (variabile per tipo, spessore e qualità). [1]

Condizioni di rivestimento superficiale

Poiché la resistenza allo scorrimento dello scafo è fortemente legata alle forze di attrito, la condizione di rugosità della superficie di quest'ultimo ha un ruolo chiave. Oltre alla rugosità dovuta a discontinuità e protrusioni (come possono essere le deformazioni di lamiere, saldature, protezioni catodiche, ecc.), influisce molto la presenza del cosiddetto fouling.

Il fouling è un fenomeno che può essere dovuto all'accumulo e deposito di organismi viventi, animali e vegetali sia unicellulari che pluricellulari (bio-fouling), o di sostanze non viventi.



Figura 4- Fouling sullo scafo di una nave

A causa del fouling (*figura 4*), oltre all'aumento della resistenza d'attrito, si possono generare sugli scafi delle navi dei fenomeni di corrosione, deteriorandoli e aumentando quindi costi di manutenzione delle navi stesse. L'incremento considerevole della resistenza d'attrito, insieme con l'aumento di peso causato dagli organismi ha come conseguenza una significativa riduzione della velocità e perdita di manovrabilità della nave. Pertanto per mantenere la velocità richiesta per coprire le tratte nei tempi previsti sarà necessario un consumo di carburante maggiore con relativo aumento dei costi e delle emissioni di sostanze dannose per l'ambiente.

La necessità di trovare una soluzione a questi problemi ha pertanto stimolato la ricerca nel campo dei rivestimenti degli scafi delle navi contro il fouling marino concependo varie tecniche di eliminazione e\o riduzione di quest'ultimo.

Nel capitolo seguente analizzeremo il metodo più utilizzato ovvero l'utilizzo di idonee pitture o vernici per la carena, al fine di "rivestirla" ed isolarla dall'ambiente marino.

3-Superfici super idrofobiche

3.1 Vernici anti-fouling

Per rivestire e isolare gli scafi delle navi dall'acqua vengono applicati sugli scafi delle navi delle vernici, resine o idonee pitture per la carena. Esse vengono applicate allo scafo della nave durante la sua costruzione ed eventualmente durante lavori di riparazione in bacino, dopo una valutazione dello strato residuo. Il ruolo primario che deve possedere una vernice navale è quello di minimizzare la resistenza d'attrito, operando indicativamente sulla scabrezza superficiale e sulla limitazione del bio-fouling.

In commercio esistono moltissime tipologie di rivestimento che si differenziano tra di loro per il diverso meccanismo di funzionamento come vernici anti-fouling. Una classificazione delle diverse tipologie di vernici che è possibile fare è basata sul fatto che quest'ultime rilascino, oppure no, dei biocidi ovvero composti tossici che hanno lo scopo di eliminare gli organismi marini.

Nelle vernici che rilasciano biocidi sono contenuti degli agenti chimici, quali ossido di rame o di zinco che, posti in contatto con l'acqua, rilasciano delle particelle che eliminano gli organismi e ne impediscono l'attaccamento allo scafo della nave.

Le vernici che non rilasciano biocidi sono denominate coating foul release e non agiscono come veri e propri deterrenti della bioincrostazione ma, piuttosto, provvedono ad un suo facile rilascio grazie alla riduzione della forza di adesione degli organismi sulla superficie stessa. In questo modo il distacco del fouling avviene anche solo grazie al peso degli organismi stessi e alle forze idrodinamiche agenti in fase di navigazione; inoltre anche la fase di pulizia in bacino risulterà facilitata. In questo caso i tipi di rivestimenti principalmente utilizzati sono due: i fluoropolimeri e i siliconi.

I fluoropolimeri, polimeri che contengono atomi di fluoro, hanno la proprietà di non essere polari, conferendo così un carattere idrofobo alla superficie.

I siliconi, polimeri inorganici basati su una catena silicio-ossigeno e gruppi funzionali organici legati agli atomi di silicio, se applicati sotto forma di film poco spessi, presentano caratteristiche anti-adesive significativamente superiori rispetto ai fluoropolimeri, e le superfici di rivestimento ottenute con questi prodotti sembrano dissuadere i gruppi funzionali di numerosi organismi marini dall'aderirvi.

A livello nanometrico la silice può essere utilizzata per modificare la struttura di un substrato rendendolo idrofobico, ma è necessario che vi siano gruppi idrofobici chimicamente legati alla superficie. Per esempio il polidimetilsilossano (PDMS), dove ogni atomo di silicio è legato a due gruppi metilici, può essere un'alternativa più efficace rispetto ai fluoropolimeri e ai siliconi. Il suo comportamento viscoelastico e le proprietà superidrofobiche lo rendono adatto e perfetto per la realizzazione di superfici superidrofobiche. Infatti questo prodotto è utilizzato come base per la costruzione delle cosiddette LIS (Liquid Infused Surfaces), superfici che, essendo impregnate con un lubrificante, sono superidrofobiche. Tali superfici, oltre ad essere molto efficaci nella riduzione dell'attrito sono auto pulenti e quindi hanno notevoli proprietà antifouling.

3.1.1 LIS

Di norma le superfici superidrofobiche sono caratterizzate dalla presenza di sacche di aria che, specialmente se messe a contatto con un liquido in movimento, possono collassare (*figura 5*). Quindi il loro utilizzo nel campo della riduzione dell'attrito sugli scafi delle navi risulta impossibile.

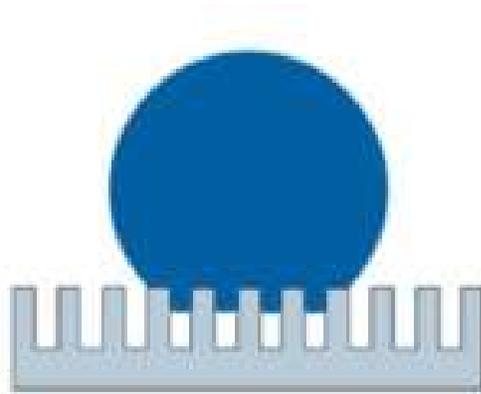


Figura 5- Superficie superidrofobica

Da qui nasce l'idea di sostituire l'aria con un lubrificante formando così una superficie composta da solido e liquido impregnante (LIS). Le LIS, garantiscono un piccolo angolo d'isteresi, sono auto pulenti, anti-icing e antifouling.

Perché la LIS possa essere considerata stabile è però essenziale che rispetti tre criteri fondamentali:

- l'affinità chimica tra il fluido lubrificante e il solido deve essere maggiore di quella tra il fluido che si intende respingere e il solido
- il substrato deve avere una rugosità caratteristica (alla micro e nano scala) in modo che si incrementi l'area superficiale adibita all'adesione del liquido impregnate e se ne consenta un intrappolamento permanente per azione delle forze capillari
- il lubrificante e il fluido esterno devono essere fortemente immiscibili.

Il lubrificante impregnerà la superficie rugosa se l'angolo di contatto tra il lubrificante e la superficie liscia del solido sarà minore dell'angolo di contatto critico θ_c definito da:

$$\theta_c = \cos^{-1} \frac{(1 - \theta_s)}{(r - \theta_s)}$$

Dove abbiamo indicato con θ_s la frazione dell'area proiettata sulla superficie rugosa che è occupata dal solido, e con r il rapporto tra l'area totale della superficie rugosa e la sua area proiettata.

Analogamente, il criterio secondo cui funziona l'impregnazione per un corpo immerso in acqua è che l'angolo di contatto tra il lubrificante e la superficie liscia in presenza di acqua sia inferiore rispetto all'angolo di contatto critico θ_c .

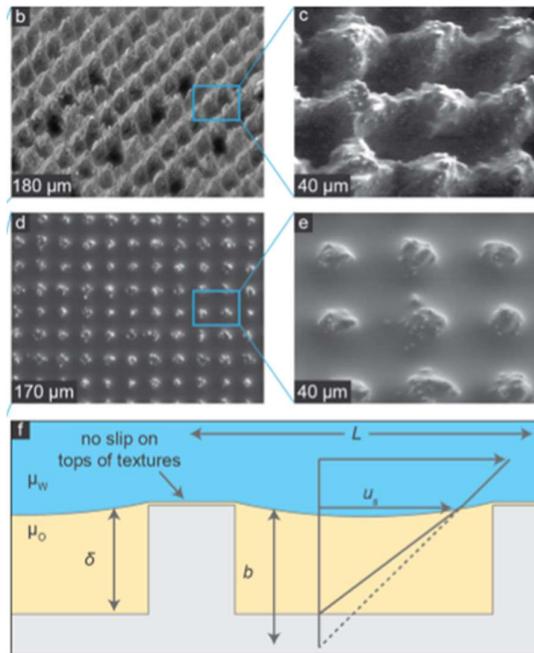


Figura 6- Rappresentazione superfici LIS

Nel caso specifico delle applicazioni per il campo navale, il liquido esterno consiste nell'acqua di mare (talvolta sostituita per le prove da acqua demineralizzata o distillata) mentre per il liquido impregnante vengono scelte sostanze apolari per massimizzare l'affinità con il substrato. [3]

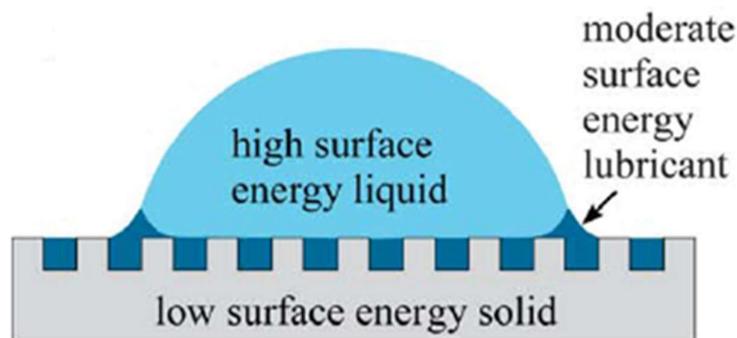


Figura 7-Goccia d'acqua su superficie LIS

L'immagine in *figura 7* illustra cosa accade quando si deposita una goccia d'acqua (o un generico liquido ad alta tensione superficiale) su una superficie LIS.

Il principio di interazione tra i due liquidi e il solido è sempre basato sull'equilibrio tra le energie di interfaccia. Tuttavia, la situazione di una goccia di acqua su una LIS risulta più complessa rispetto a quella di una goccia su un normale substrato. In questo caso infatti esistono tre delle cosiddette linee triple (linee di contatto tra tre diverse fasi) e nello specifico:

1. olio-aria-acqua lungo la linea di contatto
2. olio-solido-aria al di fuori della goccia
3. olio-solido-acqua al di sotto la goccia

Coefficiente di spreading

Una conseguenza del bilanciamento delle energie di interfaccia è che parte del liquido impregnante, anziché rimanere ancorato alla superficie vada a rivestire la goccia (*figura 8*).

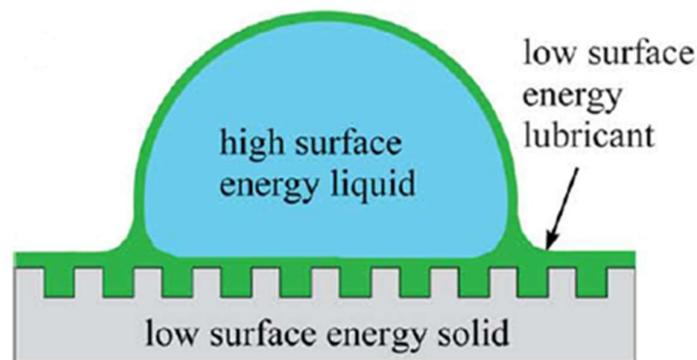


Figura 8- Fenomeno dello spreading

Questo fenomeno, individuato dal coefficiente di spreading, causa:

- Una progressiva perdita d'olio a causa del passaggio di microgoccioline sulla superficie della goccia d'acqua
- La goccia d'acqua viene contaminata dall'olio.

Il coefficiente di spreading viene definito come:

$$S_{owa} = \gamma_{wa} - \gamma_{wo} - \gamma_{oa}$$

dove γ è la tensione interfacciale tra le fasi olio (*o*), acqua (*w*) ed aria (*a*). Dato che, se il coefficiente di spreading è maggiore di zero, l'olio ricopre la goccia è necessario che tale

parametro risulti negativo per garantire che la prestazione della LIS sia duratura nel tempo. [4]

3.1.2 Fenomeni di scorrimento nei fluidi

Un altro vantaggio prodotto dall'utilizzo della LIS nel campo della riduzione degli attriti è il fenomeno dello slip length. Per spiegare questo fenomeno dobbiamo prima capire come si comporta un fluido sotto l'azione di un moto rettilineo.

Sforzo di taglio

Consideriamo una lastra piana che scorre parallelamente a un piano di appoggio orizzontale, e tra esso e il corpo stesso vi sia un fluido.

Si osserva in via sperimentale che per mantenere il corpo a velocità costante, bisogna applicare su di esso una forza F diretta nel senso del moto: ma poiché questo risulta essere uniforme, le forze agenti devono essere necessariamente nulle; ciò implica che il fluido interposto si oppone al moto del corpo esplicando una forza uguale e contraria ad F .

Se consideriamo essere fermo il meato di fluido a stretto contatto con la parete inferiore a velocità nulla, la velocità del fluido cresce a mano a mano che ci allontaniamo dalla superficie ferma, fino ad eguagliare, in prossimità del corpo che si muove, quella del corpo stesso. Ciò a testimonianza della presenza di una forza interna al fluido che ostacola lo scorrimento relativo degli strati fluidi adiacenti, e che è proporzionale al gradiente di velocità $\frac{\partial u}{\partial y}$ (se si considera una terna con componente normale y).

Possiamo definire ora con τ_{xy} lo sforzo di taglio che si esercita nella direzione x sulla superficie S normale a y :

$$\tau_{xy} = -\frac{dF}{dS} = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$$

dove μ è il coefficiente di viscosità dinamica.

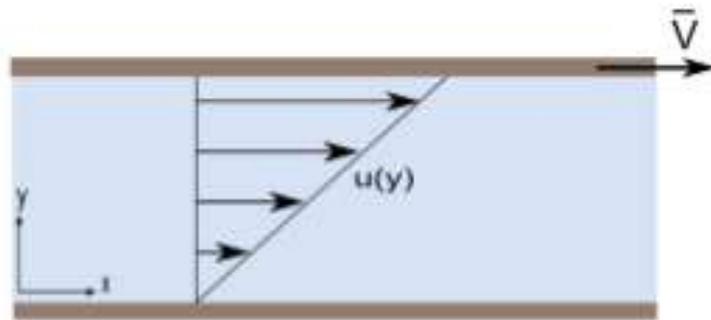


Figura 9- Fluido sotto l'azione di un moto rettilineo

Slip length

Ricorrendo ad una formulazione più generale per la velocità tangenziale nell'ipotesi di non scivolamento (slip) possiamo scrivere:

$$\mathbf{u}_{//} = 2\lambda \{ \mathbf{E} \cdot \mathbf{n} - [(\mathbf{E} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n}] \mathbf{n} \}$$

$$E = \frac{1}{2} (\nabla u + \nabla u^T)$$

avendo indicato con \mathbf{n} il vettore unitario normale alla superficie solida diretta verso il fluido e $\mathbf{u}_{//}$ la componente della velocità tangente alla superficie.

In questa equazione viene introdotto il parametro λ che è definito lunghezza di scorrimento (*slip length*): una distanza fittizia al di sotto della superficie di riferimento dove la velocità del liquido diventa zero. Maggiore è il valore della lunghezza, migliori saranno le prestazioni della superficie poiché sarà maggiore la velocità di scorrimento raggiunta dal fluido all'interfaccia: per questo si parla di condizioni di slip perfetto per $\lambda \rightarrow \infty$.

In condizioni di no-slip, quando $\lambda=0$ nel caso unidimensionale, questa equazione si riconduce a quella precedente con una velocità nulla all'interfaccia, esprimibile più semplicemente come:

$$u(y=0) = \lambda \left. \frac{du}{dy} \right|_{y=0}$$

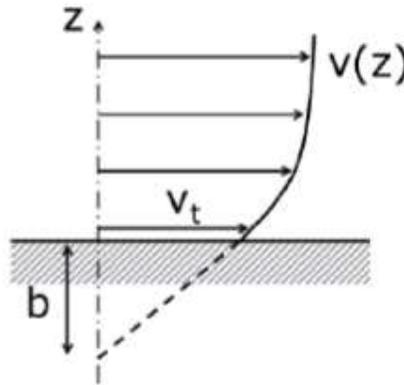


Figura 10- Fenomeno dello slip length

La velocità del flusso alla parete $u(y=0)$ è chiamata velocità di slip.

Un fluido in movimento su una superficie in cui sia presente uno strato d'aria riesce facilmente a vincere l'energia interfaciale della superficie e a scorrere in condizioni molto elevate di slip. Diversi riferimenti ci riportano infatti che su questo tipo di superfici con l'aumentare dello slip length l'attrito fluidodinamico diminuisce notevolmente. Per questo

motivo la ricerca mirata a ridurre l'attrito nel caso di una lastra piana immersa ha portato, tra le diverse soluzioni, anche ad alcune funzionanti proprio grazie all'intrappolamento di uno strato di aria sulla superficie. [5]

4-Materiali e metodi

4.1 Preparazione materiale

L'oggetto dello studio sono state delle superfici LIS ottenute da un supporto di PDMS, o di silicone, opportunamente preparato in modo da creare una microstruttura atta ad accogliere il liquido impregnante (siliconico, vaselina). I supporti sono stati creati attraverso due metodi:

- Per stampo con carta vetro
- Mediante l'utilizzo di un porogeno

4.1.1 Stampo da carta vetro

Prima di effettuare lo stampo è stato necessario preparare il polimero denominato PDMS (polidimetilsilossano). Il PDMS è un polimero caratterizzato da una notevole resistenza alla temperatura, agli attacchi chimici, all'ossidazione; è un ottimo isolante elettrico e resiste bene all'invecchiamento.

La preparazione del polimero avviene tramite il mescolamento di due componenti in rapporto 1:10. Una volta preparato il composto, questo viene inserito all'interno di una centrifuga per prevenire la formazione di bolle d'aria.

Quindi abbiamo posizionato la carta vetrata su un piano e con l'aiuto di due guide metalliche, in modo da creare uno spessore il più uniforme possibile, abbiamo steso il PDMS in pasta prima del setting. A questo punto abbiamo inserito lo stampo all'interno di un forno per accelerare la cinetica di polimerizzazione, e una volta estratto ne abbiamo ricavato mediante fustellatrice dei dischi con diametro di 5 cm in modo da poter essere applicati sui rotori per effettuare le prove a reometro descritte in seguito.

Una valutazione preliminare viene effettuata sui dischi di polimero prima dell'impregnazione. Successivamente gli stessi dischi, dopo essere stati asciugati, vengono impregnati con olio siliconico per immersione e lasciati quindi colare per 24h in modo da eliminare l'eccesso di olio, costituendo una superficie LIS. Tali superfici sono state valutate al reometro in modo da determinare il comportamento in termini di riduzione dell'attrito idrodinamico rispetto ad una superficie metallica di riferimento.

Come base per lo stampo sono stati utilizzati due campioni di carta vetrata con diverso numero di grana: più è alto il numero più è fine l'abrasivo e più liscia sarà la finitura.

Abbiamo scelto di utilizzare carta vetrata con numero di grani 180 e 320 per verificare il comportamento della LIS su diversi tipi di superficie.

Oltre al PDMS abbiamo utilizzato una gomma siliconica bi-componente liquida a rapida velocità di reticolazione.

4.1.2 Preparazione del supporto mediante l'utilizzo di un porogeno

Per differenziare maggiormente gli studi riguardanti la riduzione d'attrito si è deciso di preparare un PDMS poroso utilizzando dei porogeni come CaCO_3 e NaCl .

Per quanto riguarda la preparazione del porogeno con il carbonato di calcio abbiamo deciso di utilizzare diverse concentrazioni di CaCO_3 nel PDMS riportate nella *Tab 1*.

Tab 1. Concentrazioni PDMS e CaCO_3

	20%	30%	50%
PDMS	10 ml	8.75 ml	6.25 ml
CaCO_3	2.5 ml	3.75 ml	6.25 ml

Durante la preparazione dei composti ci siamo accorti che la concentrazione del 50% non risultava adatta all'esperimento in quanto il carbonato di calcio "assorbiva" troppo pdms, rendendo il composto troppo asciutto. Quindi non era possibile ottenere un disco uniforme ed omogeneo da applicare sui dischetti per effettuare le prove a reometro. Al contrario le concentrazioni al 20% e 30% sono risultate idonee.

Per la preparazione del porogeno con NaCl abbiamo utilizzato solo la concentrazione del 20%.

Tab 2. Concentrazioni PDMS e NaCl

	20%
PDMS	10 ml
NaCl	2.5 ml

Una volta costruiti i provini, li abbiamo immersi in acqua in modo da far sciogliere le soluzioni di NaCl e di CaCO_3 , creando così delle cavità atte a trattenere l'olio siliconico. Fissati i provini ai dischetti abbiamo eseguito le prove a reometro. Prima senza olio siliconico e poi con olio per poter confrontare i risultati e valutare gli eventuali miglioramenti.

Utilizzo pietra pomice

La pietra pomice è una roccia magmatica, leggerissima a causa dell'elevatissima porosità e quindi è l'unica pietra che galleggia nell'acqua. La sua elevata porosità è dovuta alla formazione di bolle di gas di struttura simile alla schiuma.

Avendo un peso dell'unità di volume inferiore all'acqua, la pomice galleggia basandosi sulla sua struttura a cellule sferiche, ma comunicanti tra loro nella maggior parte dei casi attraverso una non completa chiusura; quelle che non vengono invase dall'acqua consentono alla pietra di galleggiare.

Per poter creare il porogeno, abbiamo tritato la pietra pomice in modo tale da poterla mischiare con il PDMS. Anche qui, come per il carbonato di calcio e il sale, si è deciso di utilizzare diverse concentrazioni riportate nella *Tab 3*.

Tab 3. Concentrazione PDMS e pietra pomice

	20%	30%
PDMS	12.15 g	10.70 g
Pomice	2.85 g	4.30 g

A questo punto, costruiti i provini e fissati ai dischetti, abbiamo eseguito le prove a reometro. Prima senza olio silconico e poi con l'olio.

Al contrario delle soluzioni con CaCO_3 e NaCl non abbiamo immerso il porogeno in acqua, in quanto la presenza della pietra pomice creava già cavità abbastanza profonde per ospitare l'olio silconico.

4.2 Metodi sperimentali per la valutazione delle proprietà anti-atrito

In questo capitolo verranno elencate e descritte le varie misurazioni che abbiamo effettuato per verificare l'effettiva riduzione dell'atrito delle superfici LIS

4.2.1 Misurazione bagnabilità e angolo di tilt

La bagnabilità indica la capacità che ha un liquido di mantenere il contatto con una superficie solida, legata alle interazioni intermolecolari che sono presenti quando il liquido e la superficie sono in contatto. Il grado di bagnabilità è determinato dall'equilibrio tra le forze di adesione e le forze di coesione del liquido stesso. Le forze di adesione rappresentano le forze di attrazione tra specie molecolari diverse (liquido-solido) mentre le forze di coesione identificano le forze di attrazione tra molecole di tipo uguale.

Angolo di contatto	Grado di bagnabilità	Forza di:	
		Adesione	Coesione
$\theta=0$	Perfetta	Molto Forte	Molto Debole
$0<\theta<90^\circ$	Alta	Forte	Forte
		Debole	Debole
$90^\circ<\theta<180^\circ$	Bassa	Debole	Forte
$\theta=180^\circ$	Nulla	Molto Debole	Molto Forte

Figura 11- Angoli di contatto e gradi di bagnabilità

Quando una piccola porzione di liquido entra in contatto con un corpo solido si viene a creare una goccia il cui angolo formato tra la tangente al profilo della goccia nel punto triplo di interfaccia solido-liquido-aria e l'orizzontale, denominato angolo di contatto, è indice del grado di bagnabilità della superficie rispetto al liquido utilizzato (figura 11). [6]

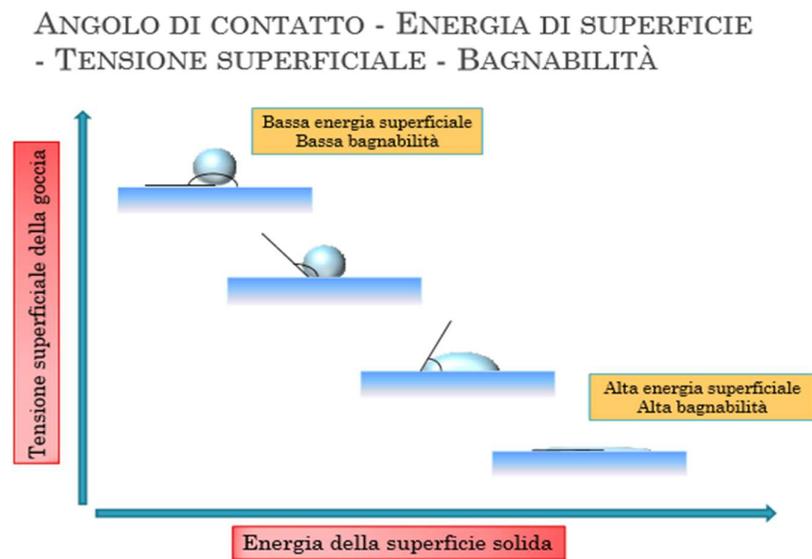


Figura 12-Andamento energia di superficie e tensione superficiale della goccia d'acqua

Nel caso particolare dell'acqua una superficie si può definire:

1. Idrofilica: angolo di contatto tra 0 e 90 gradi
2. Idrofobica: angolo di contatto tra 90 e 150 gradi
3. Superidrofobica: angolo di contatto maggiore di 150 gradi

Esistono due tipi di angolo di contatto: statico e dinamico.

Per effettuare la misura dell'angolo di contatto statico è necessario acquisire un'immagine frontale del profilo della goccia sul piano su cui è appoggiata. Allo scopo di ottenere una misura realistica bisogna tenere conto di alcuni aspetti: la goccia deve essere simmetrica rispetto all'asse verticale e la forma deve essere dovuta solo all'equilibrio tra le forze di interfaccia e la forza peso.

La dimensione della goccia deve essere sufficientemente piccola da non avere una forma distorta dal suo stesso peso, ma di dimensioni maggiori rispetto alla rugosità superficiale. Inoltre la goccia deve essere posizionata con cautela onde evitare che impatti con il piano. Come ultimo accorgimento per determinare l'angolo di contatto correttamente è necessario acquisire un'immagine di alta qualità e con una linea di messa a fuoco opportuna, considerando la forma sferica tipica della goccia.

La misura dell'angolo di contatto statico fornisce informazioni solo parziali riguardo le proprietà della superficie che si intende studiare. È un buon indicatore di idrofobicità, ma ai fini della riduzione d'attrito è evidente che sono le condizioni dinamiche quelle che destano maggiore interesse. Quindi risulta particolarmente utile misurare l'angolo di contatto dinamico ossia l'angolo di contatto di una superficie inclinata.

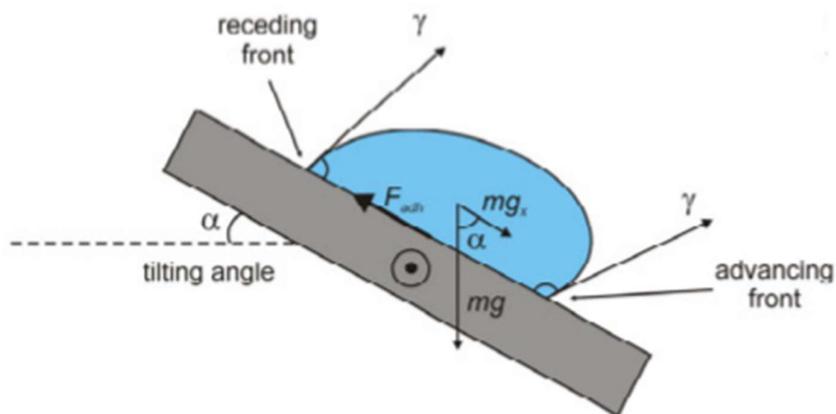


Figura 13- Angoli di contatto dinamici

Si definisce isteresi la differenza tra l'angolo di contatto frontale della goccia detto di advancing e quello posteriore detto receding.

$$H = \theta_A - \theta_R$$

Si definisce inoltre angolo di tilt l'angolo minimo a cui deve essere inclinata una superficie perché la goccia sia in grado di mettersi in moto.

L'angolo di tilt è legato all'isteresi dell'angolo di contatto tramite l'equazione seguente in cui la parte sinistra dell'equazione rappresenta il contributo della forza di gravità mentre quello di destra rappresenta quello legato alla tensione superficiale.

$$\rho V g \sin \alpha = \gamma D_c (\cos \theta_R - \cos \theta_A)$$

Dove:

ρ = densità acqua;

V = volume goccia;

g = accelerazione gravità;

α = angolo inclinazione piano;

γ = tensione superficiale acqua;

D_c = diametro critico superato il quale la goccia comincia a muoversi.

Dal momento che l'isteresi è direttamente proporzionale all'angolo di tilt, minimizzare l'isteresi significa ottenere una fuga del liquido a inclinazioni molto basse e quindi un coefficiente di attrito minore.

Per ottenere la misura dell'angolo di tilt abbiamo adottato una procedura che consisteva nell'avere un riferimento fisso orizzontale sullo sfondo e una sbarra verticale solidale con un piano inclinabile (figura 14).

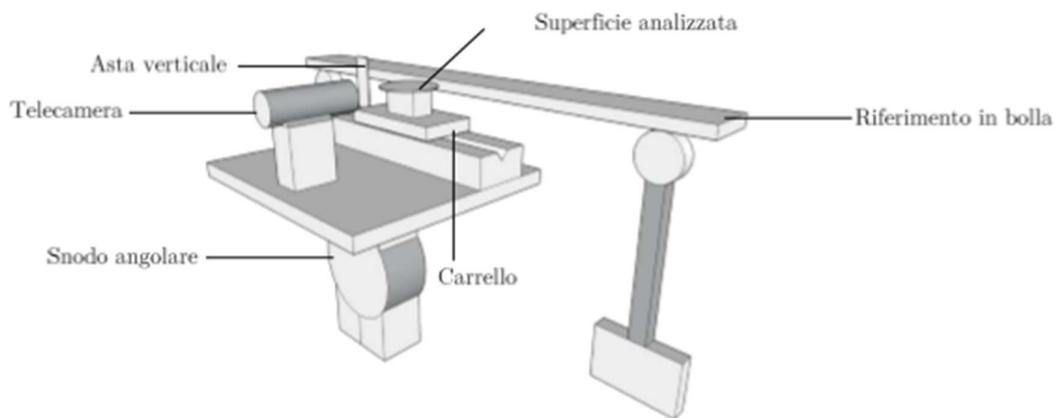


Figura 14-Misurazione angolo di tilt

Mediante l'inquadratura con la telecamera Dynoscope si fissa un angolo di riferimento ad inclinazione nulla, misurata con l'ausilio di due livelle teoriche.

L'angolo zero si ottiene direttamente dall'immagine, costruendo con l'utilizzo di un software due rette parallele rispettivamente al riferimento fisso orizzontale e alla sbarra verticale e misurando l'angolo formatosi. Le cifre significative fornite dal software sono 3, ma considerando le imprecisioni di allineamento, che viene effettuato manualmente, è significativa solo la prima di esse, in quanto risulta l'unica replicabile. [1]

4.2.2 Misure reometriche

Le misure reometriche consistono nell'individuare le proprietà reologiche di un fluido come ad esempio la viscosità.

La misura della viscosità dei liquidi richiede dapprima la definizione dei parametri che riguardano il flusso.

Isaac Newton fu il primo a formulare la legge fondamentale della viscosimetria che descrive il comportamento di flusso di un liquido ideale.

$$\tau = \mu \cdot D$$

τ = sforzo di taglio (shear stress)

μ = viscosità

D = gradiente di velocità (velocità di deformazione, shear rate)

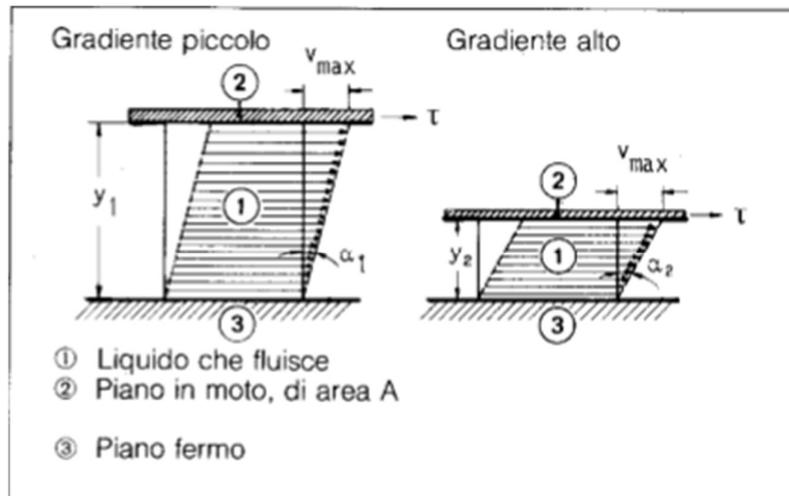


Figura 15-Rappresentazione linee di flusso in funzione del gradiente di velocità

Lo sforzo di taglio

Una forza tangenziale F applicata ad un'area A (interfaccia tra il piatto superiore ed il liquido sottostante) provoca un movimento (scorrimento) nello strato liquido. La velocità di flusso che può essere mantenuta per una data forza sarà determinata dalla resistenza interna del liquido, cioè dalla sua viscosità

Il gradiente di velocità

Lo sforzo di taglio provoca uno scorrimento del liquido. Ipotizzando che si lavori in un regime laminare, il che significa che gli strati liquidi infinitamente sottili scivolano uno sull'altro come le carte di un mazzo da gioco, uno strato laminare risulta spostato rispetto allo strato adiacente di una frazione dello spostamento totale che si ha nel liquido tra i piatti. La massima velocità di scorrimento V_{\max} si avrà nello strato superiore. La velocità decresce lungo la sezione fino al valore $V_{\min} = 0$ dello strato limite a contatto col piatto stazionario (figura 15).

4.2.3 Strumento e metodologia di prova

Nelle nostre esperienze abbiamo utilizzato il reometro Physica Anton Paar MCR 301.[11] Il sistema è realizzato in modo da ridurre al minimo il numero delle variabili indipendenti che influenzano le misurazioni di coppia. Esso monta un motore sincrono con un encoder incrementale ad alta risoluzione ottica ($< 1 \mu\text{rad}$), cuscinetti ad aria compressa alimentati mediante apposito compressore ad una pressione pari a 5 bar, che minimizzano l'attrito della coppia cinematica e un tachimetro per misurare la velocità di rotazione. Tutto il sistema propulsivo viene montato su giunti flessibili, così da eliminare le vibrazioni causate dalla rotazione del rotore.

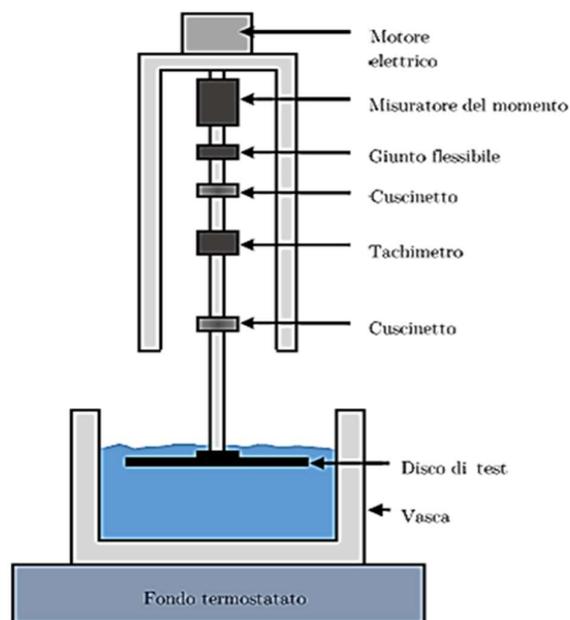


Figura 16- Schema del setup sperimentale

La misura di coppia che si ottiene ha la risoluzione dello 0.1 nNm in un range di misure, che va da un fondo scala pari a 0.05 μ Nm fino ad un valore massimo di 200 mNm. Il reometro può funzionare con velocità di rotazione continua che varia tra i 10^{-7} rpm e 3000 rpm e in oscillazione rotazionale con frequenza tra i 10^{-5} e 100 Hz e con una risoluzione dello 0.01 μ rad.[11] L'azionamento del motore elettrico sfrutta un apparato che opera in retroazione, e, grazie a sensori e centralina elettronica, consente di attuare un controllo sulle variabili meccaniche. Per ridurre i cimenti dinamici che si accentuano ad alte velocità di rotazione, il rotore è stato progettato e realizzato con tolleranze molto fini, per garantire che la struttura sia giroscopica, e in seguito è stato sottoposto a processo di equilibratura statica e dinamica. Possono inoltre essere misurate le forze normali agenti sull'asse in un range di misure tra lo 0.01 N e i 50 N con una risoluzione dei 2 mN. L'apparato monta anche un termostato con un sistema a Peltier in modo da garantire una termoregolazione in un ventaglio di temperature che va dai -40 ai 200 °C con una velocità di riscaldamento massima di 60 K/min e una velocità di raffreddamento massima di 50 K/min. Per poter interagire con il reometro, si ha in dotazione il programma Rheoplus, sviluppato dalla casa produttrice; esso ci permette di settare a pc le modalità di prova ed ottenere i dati oggetto delle misurazioni anche in tempo reale, grazie all'interfaccia grafica. In particolare, i dati per noi più rilevanti sono stati i grafici della coppia in funzione della velocità angolare. Come fluido per le prove è stata impiegata acqua comune.

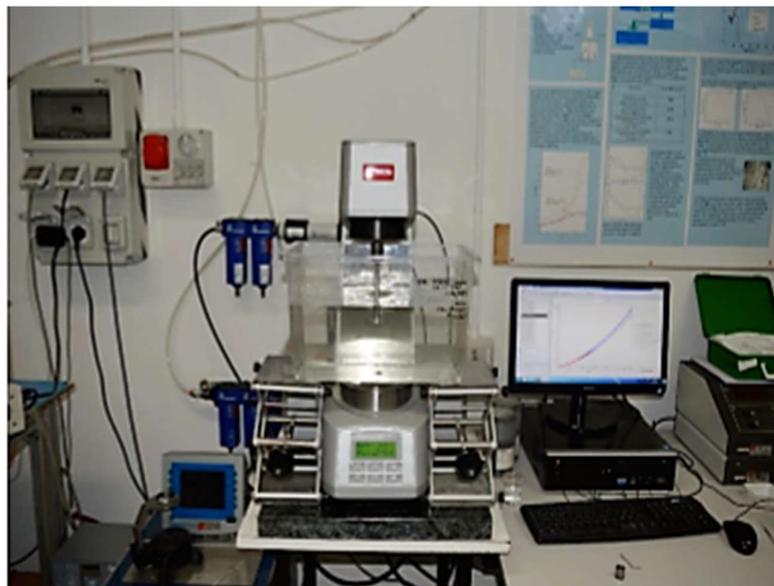


Figura 17-Setup sperimentale completo

Nel nostro caso, per i test si sono utilizzati dei rotori intercambiabili di alluminio a forma di disco con diametro pari a 50 mm e spessore pari a 1,5 mm, rivestiti unicamente sulla faccia inferiore con il materiale da valutare (*figura 18*).

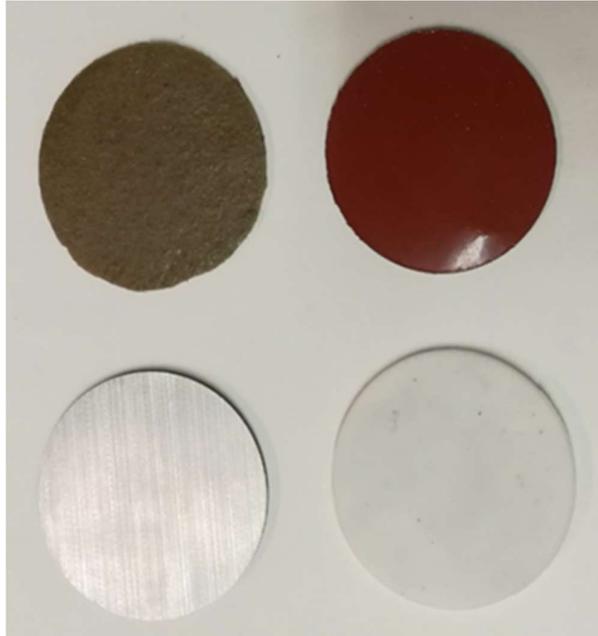


Figura 18-Dischetti utilizzati negli esperimenti



Figura 19-Asticella utilizzata per l'attacco del disco al reometro

Per poter effettuare l'immersione si è utilizzato una vaschetta di forma rettangolare avente dimensioni 19 cm di larghezza, 33 cm di lunghezza e 19 di altezza, dimensioni dettate dallo

spazio massimo disponibile tra la colonna di supporto del reometro e il piano di misura. Si è pertanto scelto di adottare il contenitore più ampio possibile entro quei limiti in modo da aumentare la massa d'acqua e ridurre al massimo gli effetti del confinamento del fluido in uno spazio finito, tra cui l'interazione del flusso, in direzione radiale uscente, con le pareti. Durante le prove si è riempita la vaschetta con un volume indicativo di 9,5 L. Tutte le misure sono state effettuate immergendo il rotore fino ad una misura fissata di 40 mm. [7]

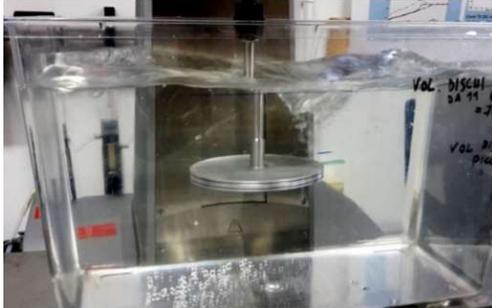


Figura 20-Disco immerso



Figura 21-Vasca utilizzata per l'esperimento

Per condurre le prove si è adottato una rampa lineare (quindi operando in regime di accelerazione costante) con velocità di rotazione del rotore crescente da 0 a 3000 rpm in 300 secondi. La variabile misurata in funzione della velocità angolare è la coppia torcente necessaria per mantenere il rotore in rotazione alla velocità desiderata.

Per l'elaborazione dei dati si è però scelto di adimensionalizzare la coppia introducendo un coefficiente di momento, C_M , di cui è riportata l'equazione, dove R è il raggio del disco, ρ la densità dell'acqua e ω la velocità di rotazione angolare:

$$C_M = \frac{2M}{\frac{1}{2} \rho \omega^2 R^2}$$

Il fattore 2 al numeratore è dovuto al contributo di entrambe le superfici del disco superiore e inferiore; è trascurato il contributo della superficie laterale.

Anziché la velocità angolare ω si è preferito utilizzare il numero di Reynolds (Re) come parametro, secondo la relazione:

$$Re = \frac{\omega R^2}{\nu}$$

con ν la viscosità cinematica dell'acqua e R il raggio del rotore.

5-Risultati

5.1 Normalizzazione dati

Come anticipato nel capitolo precedente, per descrivere i risultati ottenuti tramite gli esperimenti, abbiamo utilizzato il numero di Reynolds e il coefficiente di momento.

Queste misure ci permettono un approccio più realistico rispetto al sistema piatto-piatto, in quanto il rotore è completamente immerso in acqua e simula meglio il comportamento di una carena di nave immersa. Inoltre abbiamo la possibilità di analizzare un più ampio range di velocità angolari del rotore.

Infine non è più necessario un settaggio micrometrico della distanza tra statore e rotore, difficile da ottenere in caso di superfici non perfettamente piane.

Uno dei problemi riscontrati nell'analisi dei risultati è stato che il contributo relativo alla superficie laterale del rotore non viene considerata nel calcolo del C_M . Il suo contributo nel C_M è trascurabile solo per dischi immersi di piccolo spessore, ma diventa significativo per spessore maggiori di 0,5 mm. Dato che lo strato di LIS con cui abbiamo rivestito il rotore incrementa lo spessore dello stesso, e non è nemmeno sempre uguale, per effettuare le misure di comparazione con il disco senza lo strato di LIS, è stato necessario aggiungere al disco singolo uno o due dischi a seconda dello spessore che ottenevamo con l'applicazione della LIS. Quindi è stato necessario adottare una procedura di normalizzazione dei dati ottenuti dai rotori di diverso spessore.

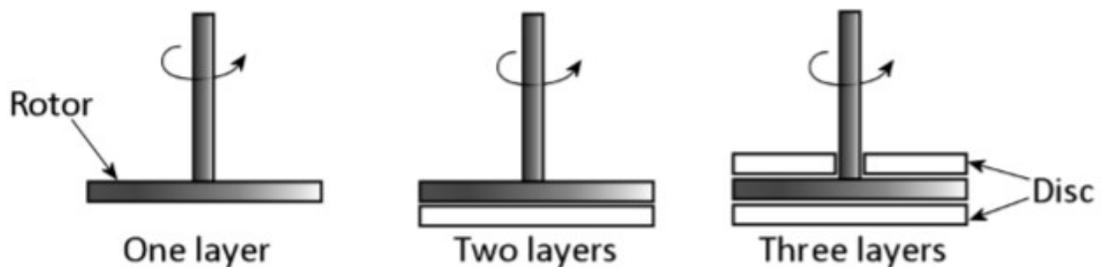


Figura 22-Schema diversi spessori dei dischi

Per la normalizzazione della coppia, abbiamo messo in relazione il C_M generato dal disco doppio (rotore più un disco) e dal disco triplo (rotore più due dischi) con quello generato dal singolo disco. In *figura 23* troviamo rappresentati gli andamenti di C_M in funzione di Reynolds in base allo spessore del rotore.

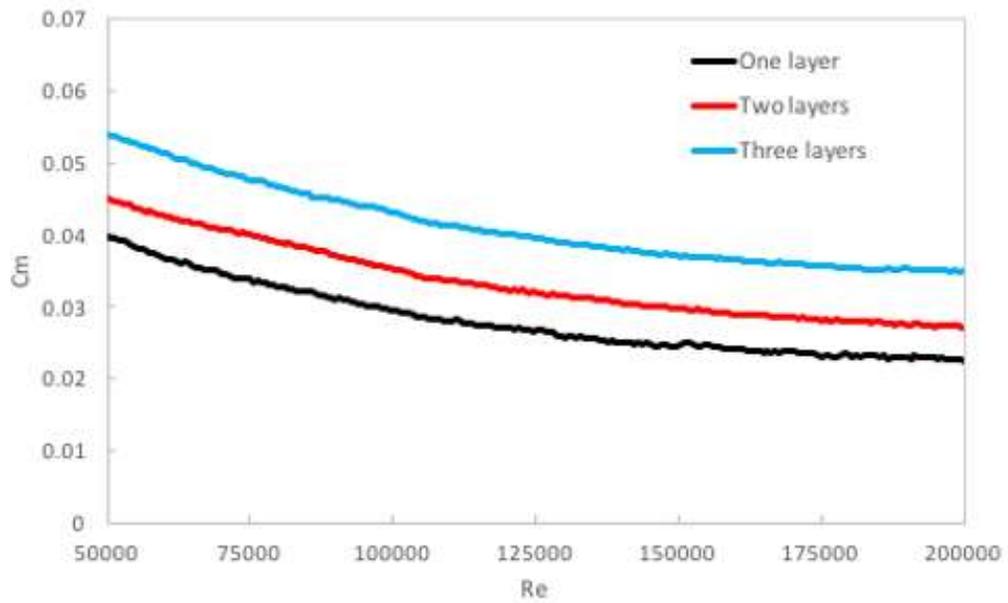


Figura 23-Andamenti di C_m in funzione di Re in base allo spessore

Per effettuare la normalizzazione abbiamo calcolato l'incremento del coefficiente di momento dovuto all'aumento di spessore rispetto a quello generato dal disco singolo. Questo incremento è stato calcolato come:

$$\Delta C_{M1,2} = C_{M2} - C_{M1}$$

$$Incr C_{M2} = \frac{\Delta C_{M1,2}}{C_{M1}}$$

In modo analogo è stato calcolato l'incremento di C_M dovuto al triplo disco.

Confrontando l'andamento ($Incr C_{M2}, Incr C_{M3}$) in funzione del numero giri di rotazione, abbiamo notato che dopo circa 1000 rpm (Re oltre 75000) il valore è costante e indipendente dal numero di Reynolds.

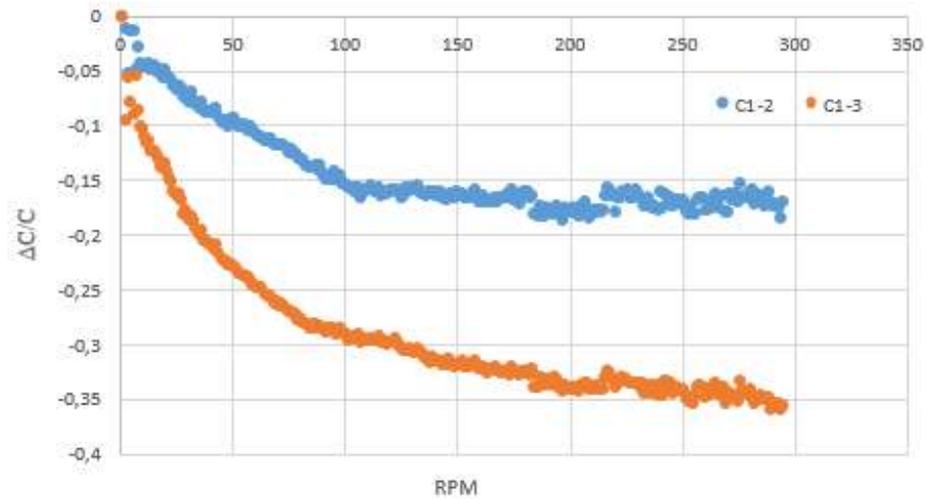


Figura 24-Incremento della coppia dovuta dallo spessore in funzione di Re

L'incremento, in funzione dello spessore, è lineare ed è descritto dall'equazione $\frac{\Delta C_M}{C_M} = -0.0917 x$ come riportato nel grafico in figura 25.

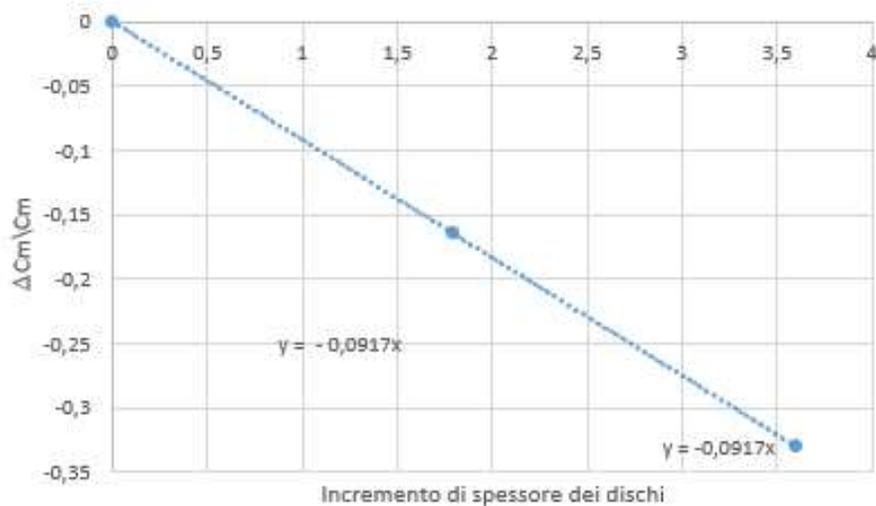


Figura 25-Incremento lineare della coppia in funzione dello spessore

A questo punto abbiamo ricalcolato tutti i valori dei C_M sottraendo al valore della coppia generata dal disco (doppio o triplo) quello della coppia dovuta all'incremento di spessore ottenendo così un valore del C_M confrontabile con il C_M del disco singolo.

$$Norm C_M = C_{M2} - (0.0917 * spessore\ disco)C_{M2}$$

In questo modo abbiamo ottenuto andamenti della coppia generata dai diversi dischi di diverso spessore molto simili tra loro, ad eccezione della regione $Re < 75000$. [8]

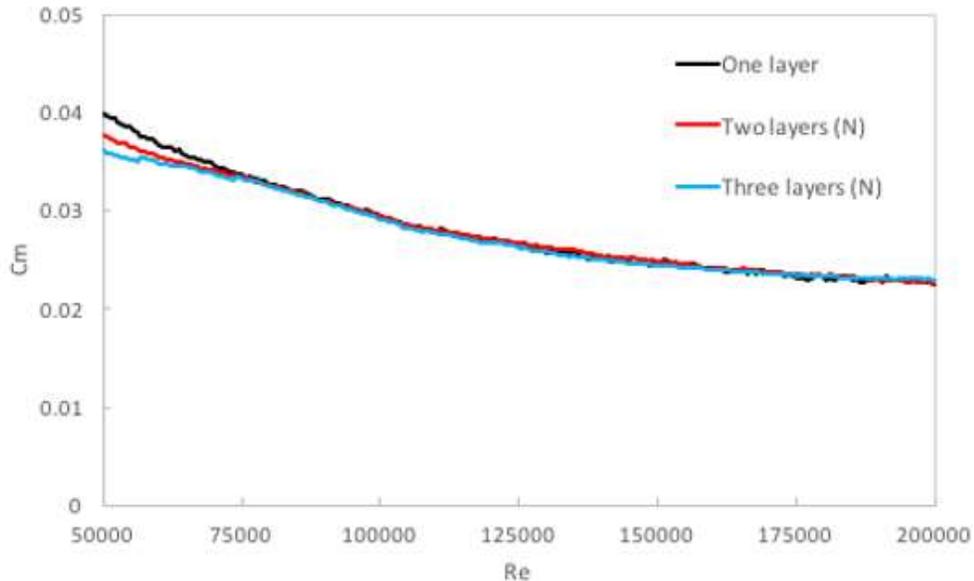


Figura 26-Andamento della coppia normalizzata

5.2 Misure reometriche

Per ogni rivestimento studiato, sono state eseguite 3 prove in modo da poter valutare la riproducibilità del dato. In seguito questi dati sono stati elaborati in Excel attraverso le equazioni del C_M e di Re , in modo da ricavare i coefficienti adimensionali da visualizzare e confrontare.

Durante l'elaborazione dei dati si è scelto di riportare l'andamento delle curve per un Re maggiore di 75000. Tale valore corrisponde infatti ad una velocità equivalente di circa 5 nodi, al di sotto della quale risultano di scarso interesse gli effetti di minor coefficiente essendo inferiore alla velocità di crociera tipica per un'imbarcazione mercantile.

Di seguito vengono riportati i risultati delle prove confrontate con l'andamento della coppia generata dal disco di acciaio non trattato con LIS (nel seguito indicato come "Ref")

Stampo da carta vetro

Di seguito viene riportato l'andamento della coppia in funzione del numero di Reynolds della LIS applicata sullo stampo PDMS ottenuto dalla carta vetro con diversa granulometria.

Dalle curve in *figura 27* si osserva che nessuna delle due granulometrie (180 e 320) ha prodotto risultati positivi.

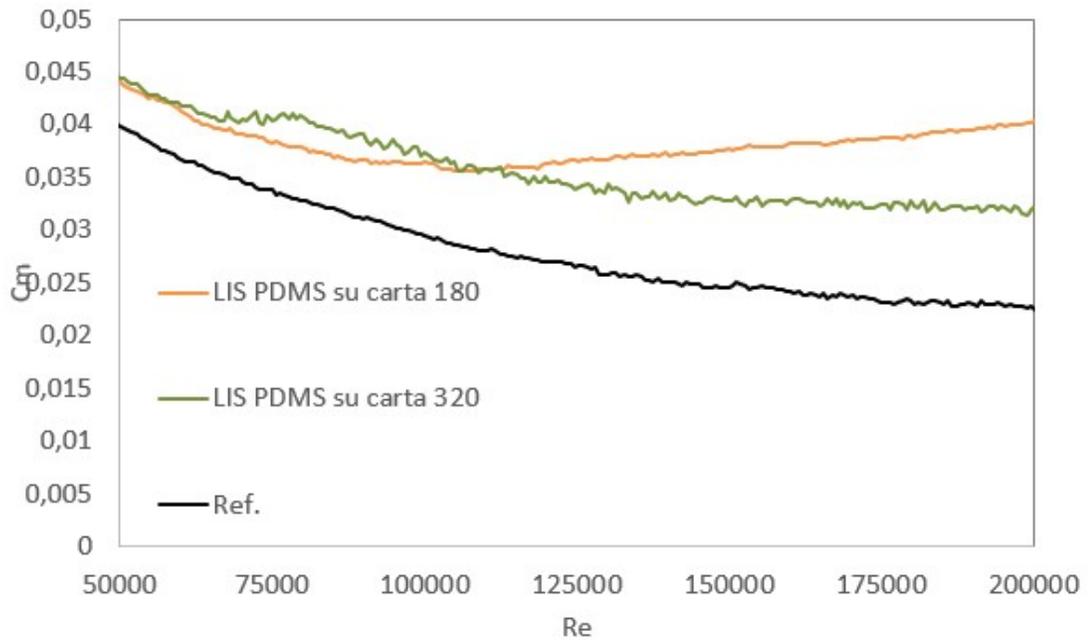


Figura 27-Andamento coppia della LIS su pdms ottenuta da carta vetro

Stesso risultato negativo, nonostante sia leggermente migliore rispetto al PDMS, anche per la LIS applicata sullo stampo di gomma siliconica applicato anch'esso alle granulometrie 180 e 320 della carta vetro.

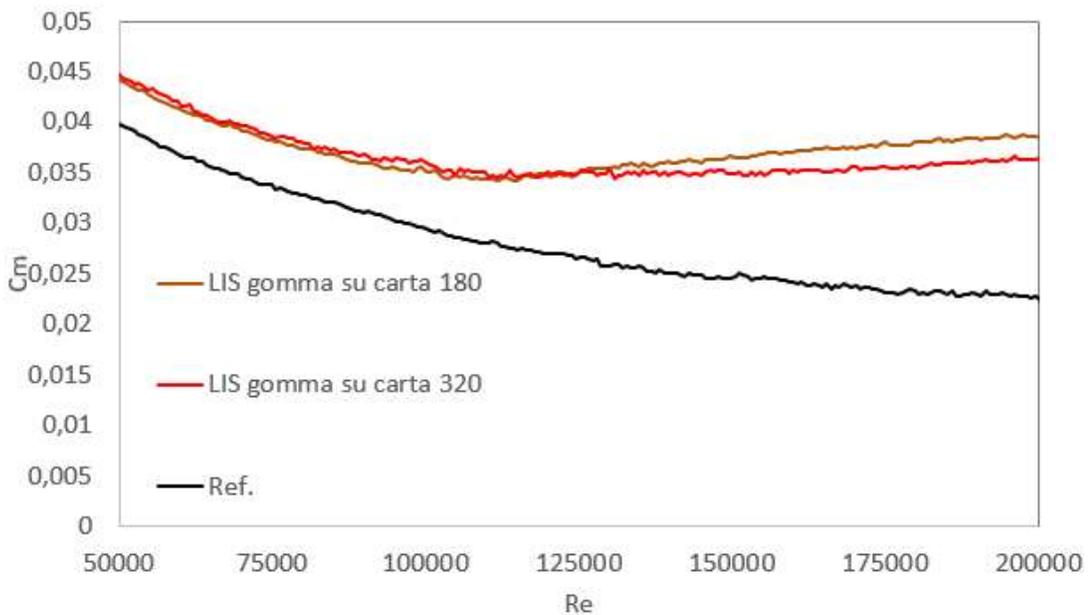


Figura 28-Andamento coppia della LIS su gomma ottenuta da carta vetro

In entrambe le prove (PDMS e gomma siliconica) è stato utilizzato lo stesso olio ad alta viscosità per ottenere la superficie LIS.

LIS sui porogeni

Come anticipato precedentemente non è stato possibile ottenere un disco uniforme ed omogeneo da applicare sui dischetti per effettuare le prove a reometro con la concentrazione al 50% di carbonato, quindi le prove sono state effettuate solo per le concentrazioni al 20% e 30%.

Per quanto riguarda la LIS ottenuta attraverso il sale è stata effettuata solamente la prova con concentrazione al 20% perché abbiamo notato che il sale NaCl provoca un'eccessiva rugosità superficiale aumentando notevolmente le turbolenze e di conseguenza aumenta anche il C_M .

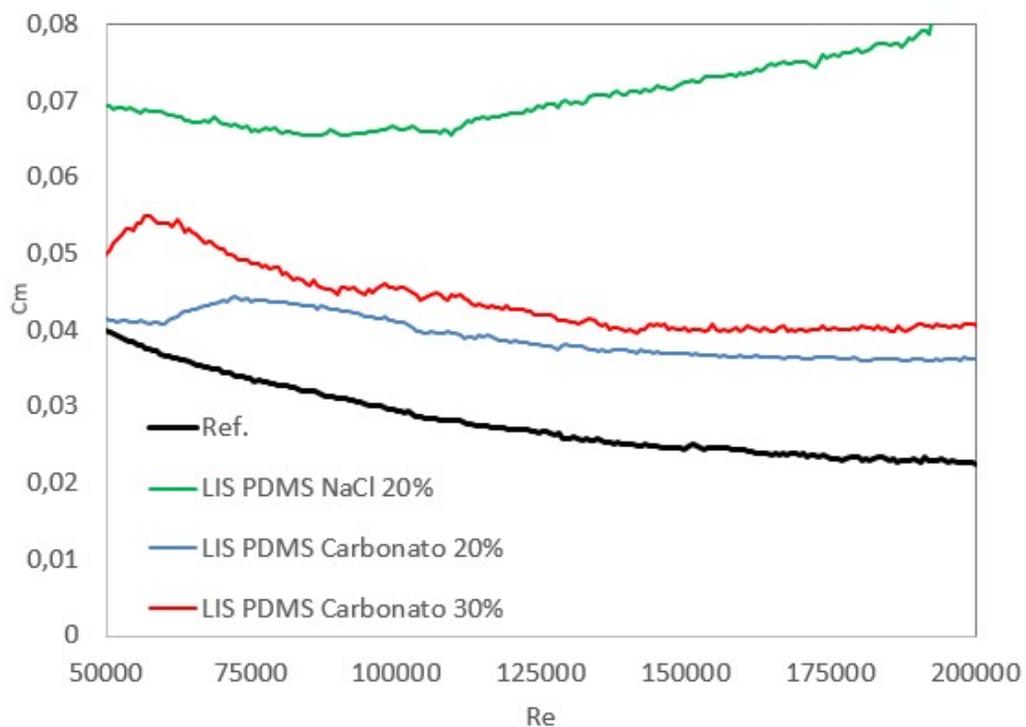


Figura 29-Andamento coppia della LIS sui porogeni

Anche qui non siamo riusciti ad ottenere risultati positivi o quantomeno vicini al riferimento ottenuto dal solo disco di acciaio senza LIS.

LIS ottenuta con pietra pomice

Come ultimo esperimento si è deciso di utilizzare la pietra pomice all'interno del PDMS in modo tale da creare micro cavità abbastanza profonde da ospitare e mantenere inglobato l'olio siliconico.

Anche qui sono state utilizzate due diverse concentrazioni: 20% e 30%

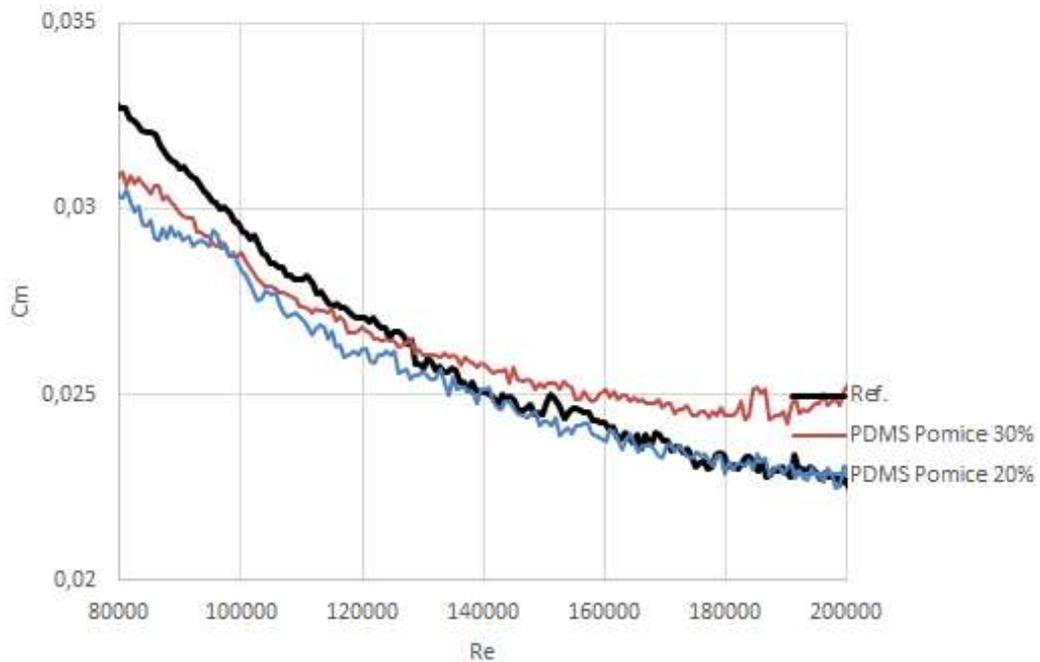


Figura 30-Andamento coppia della LIS ottenuta con pietra pomice

Come si può notare dal grafico i risultati ottenuti sono abbastanza soddisfacenti soprattutto per la LIS con la concentrazione di pomice al 20%. Fino ad un Re di circa 140000 ha un comportamento migliore rispetto al solo disco di acciaio, poi ha un comportamento molto simile a quest'ultimo.

La LIS invece con la concentrazione al 30% dopo un certo numero di Re (circa 130000), inizia a peggiorare il suo comportamento. Questo può essere dovuto all'eccessiva rugosità che aumenta la turbolenza e riduce l'efficienza della LIS.

6-Conclusioni

Come si evince dall'elaborato i test in laboratorio non hanno prodotto i risultati da noi sperati, tranne per quanto riguarda le prove effettuate con LIS ottenuta mediante la pietra pomice con concentrazione al 20%. Il suo comportamento infatti si è rivelato leggermente migliore rispetto al disco singolo in acciaio; quindi è presente una base da cui partire per eventuali esperimenti futuri.

Il problema principale della non riuscita di molti esperimenti consiste nel fatto che il confronto è stato eseguito con un disco di acciaio perfettamente liscio, privo di irregolarità e con la quasi totale assenza di effetti di bordo, creati invece dall'attacco della LIS sui dischetti, i quali creavano un notevole aumento della coppia generata dal disco. Quindi possiamo assumere il dischetto di acciaio come una superficie "ideale" e non paragonabile allo scafo di una nave che è tutt'altro che liscio.

Precedenti studi effettuati da altri tesisti avevano rilevato il funzionamento della LIS sulla superficie di una lega d'alluminio. In questo caso infatti la curva si manteneva al di sotto del riferimento per tutti i Re: la microstruttura e il tipo di impregnazione hanno consentito di ottenere una diminuzione dell'attrito compresa tra l'1 e il 4%.

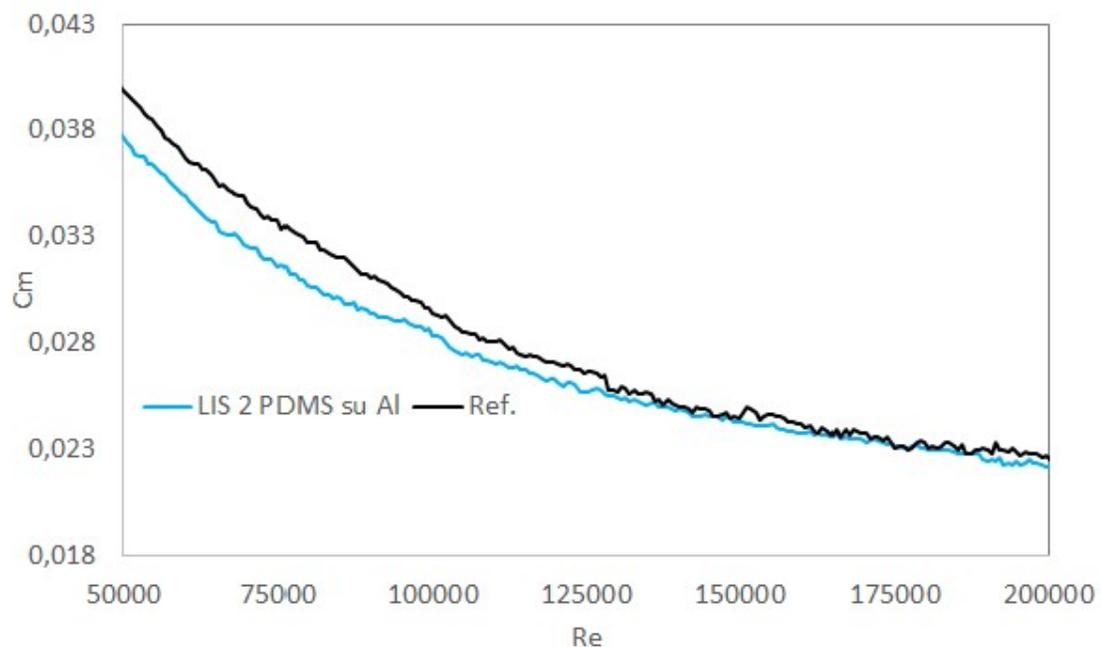


Figura 31-Andamento coppia della LIS applicata sul disco di alluminio

Purtroppo per una questione di costi elevati non è possibile costruire gli scafi delle navi in alluminio.

Bibliografia

- [1] Utili E. “Preparazione e caratterizzazione di superfici LIS su supporto metallico e polimerico per la riduzione dell’attrito idrodinamico e del fouling in ambito navale”, 2017, Università degli Studi di Genova, Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali, Tesi di Laurea in Scienza e Ingegneria dei Materiali
- [2] Ferrando M. “Appunti del corso Architettura Navale 1: Componenti di resistenza”, Università di Genova, Scuola Politecnica, 2013.
- [3] Brian R. Solomon, Karim S. Khalil, and Kripa K. Varanasi “Drag Reduction using Lubricant-Impregnated Surfaces in Viscous Laminar Flow”, *Langmuir* 2014, 30, 10970–10976
- [4] Mammi M. “Utilizzo di rivestimenti LIS per la riduzione dell’attrito in ambito navale”, 2016, Università degli studi di Genova, Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali, Tesi di Laurea Magistrale in Fisica
- [5] Mondelli P. “Fenomeni dello scorrimento apparente su superfici superidrofobe: effetto della geometria del menisco”, 2012, Sapienza Università di Roma. Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica.
- [6] Basicò L. “Forze di interazione tra le particelle e superficie”, 2010, seminario per il corso di Bioingegneria elettronica.
- [7] Menta M. Hafid Kyoto Tinoco Giraldo “Misure d’attrito idrodinamico su superfici verniciate”, 2016, Università degli Studi di Genova, Scuola Politecnica. Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica.
- [8] Deliverable D4.2, “Innovation challenge” aprile 2017.

Simbologia

C_t	Coefficiente di resistenza totale
R_t	Resistenza totale
P	Densità
S	Superficie bagnata
v	Velocità della nave
P_E	Potenza effettiva
R_R	Resistenza residua
R_A	Resistenza all'aria
R_w	Resistenza d'onda
R_v	Resistenza di scia
R_F	Resistenza d'attrito
Re	Numero di Reynolds
L	Lunghezza
ν	Coefficiente di viscosità cinematica
Fr	Numero di Froude
g	Accelerazione di gravità
θ_c	Angolo di contatto critico
θ_s	Frazione dell'area proiettata sulla superficie rugosa occupata dal solido
r	Rapporto area totale superficie rugosa e la sua area proiettata
θ_A	Angolo di advancing
θ_R	Angolo di receding
$Sowa$	Coefficiente di spreading

λ	Lunghezza di scorrimento
μ	Coefficiente di viscosità dinamica
τ_{xy}	Sforzo di taglio
γ	Tensione superficiale acqua
α	Angolo inclinazione piano
$V_{\max (\min)}$	Velocità di scorrimento massima (minima)
ω	Velocità di rotazione angolare
M	Momento
R	Raggio del disco
C_M	Coefficiente di momento