



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTA' DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA
SETTORE MATERIALI

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Materiali

ELABORATO FINALE

RIVESTIMENTO ANTIADERENTE PER LA MANIPOLAZIONE
DELLE MATERIE PRIME NELL'INDUSTRIA ESTRATTIVA

Relatore: Prof. Dabalà Manuele
Correlatore: Ing. Orobelli Fabio

Laureando: Petrescu Mihai

Anno Accademico 2012/2013

Capitolo 1

Introduzione

La rapida evoluzione dell'economia industriale in questi ultimi anni sta ponendo molte aziende di fronte all'esigenza di rivedere le proprie scelte sui materiali utilizzati nei diversi prodotti. La ricerca di soluzioni alternative parte da due criteri fondamentali: l'aumento dei costi e le difficoltà di approvvigionamento.

Sempre più spesso si arriva a concludere che una visione strategica nella scelta dei materiali rappresenta oggi un'opportunità sostanziale di economia e sviluppo per le aziende.

La Bedeschi Spa. è una delle più vecchie aziende produttrici di macchinari e attrezzature per l'estrazione, la manipolazione e la frantumazione delle materie prime nell'industria dei laterizi in Europa. Più di un secolo fa il fondatore, il sig. Guglielmo Bedeschi, riusciva a costruire il primo estrusore per il quale viene premiato con la medaglia d'oro alla Esposizione Internazionale di Torino nel 1909 e da allora l'azienda ha registrato un costante e stabile sviluppo sotto il management dei membri della famiglia.

La progettazione, la costruzione delle macchine e l'assistenza tecnica sono il risultato di oltre un secolo di esperienza. I prodotti dell'azienda includono oggi, in più rispetto alle macchine tradizionali, linee complete per la preparazione delle materie prime nell'industria del cemento, una grande varietà di attrezzature per la manipolazione del materiale in massa (bulk) per diversi campi di applicazione e una gamma completa di impianti di frantumazione che riesce a coprire ogni tipo di necessità dall'industria mineraria fino al riciclaggio dei rifiuti solidi urbani. La vendita dei propri prodotti è diffusa in tutto il mondo con un tasso di esportazione di oltre il 90%, con diversi uffici di rappresentanza e filiali in tutto il mondo per servire i mercati esteri. In più, il servizio post-vendita ha reso possibile il raggiungimento di un traguardo impressionante: ci sono ancora in servizio parti di ricambio e macchine da oltre sessanta anni! L'attività della società è stata incentrata sulla movimentazione di materiali difficili come il carbone e argilla appiccicosa, sull'estrazione ed il trasporto di materiale secco altamente abrasivo o di altri minerali

- Circular Storage - diameter 105 m
Stacker STKR 31/1800 + Reclaimer PAL T 220/49

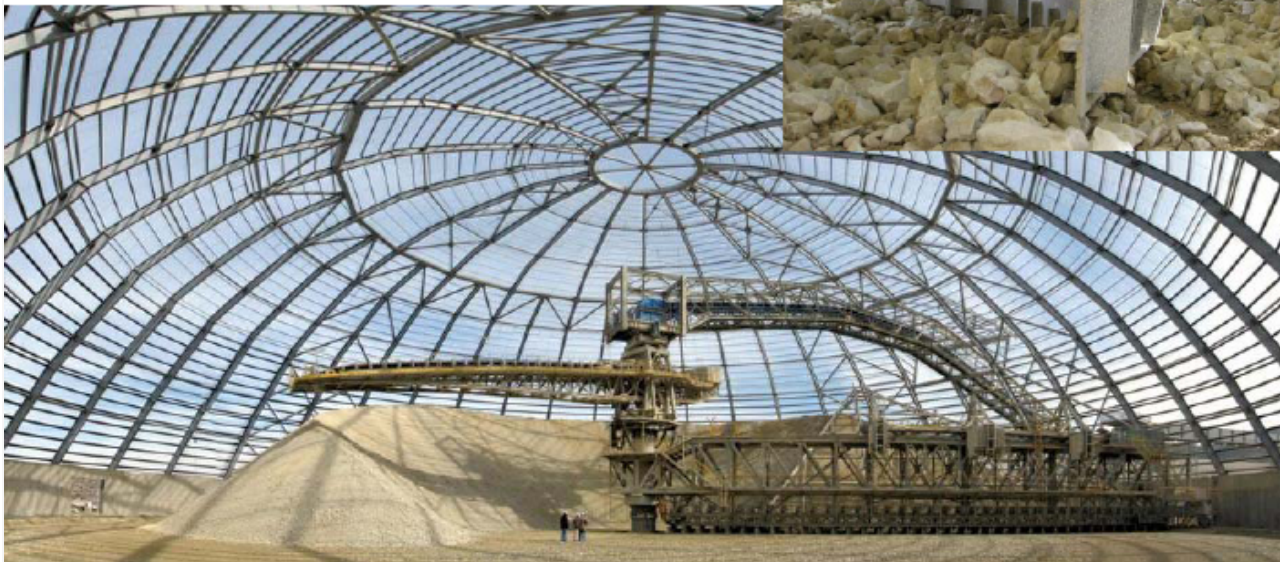


Figura 1.1 Silos circolare



Figura 1.2 Impianti di movimentazione per il settore marino.



Figura 1.3 Frantumatore pesante: resistenza del materiale alla compressione fino a 1800 kg/cm^2 , diametri fino a 1200 mm , larghezza fino a 2000 mm , output fino a 1000 t/h .

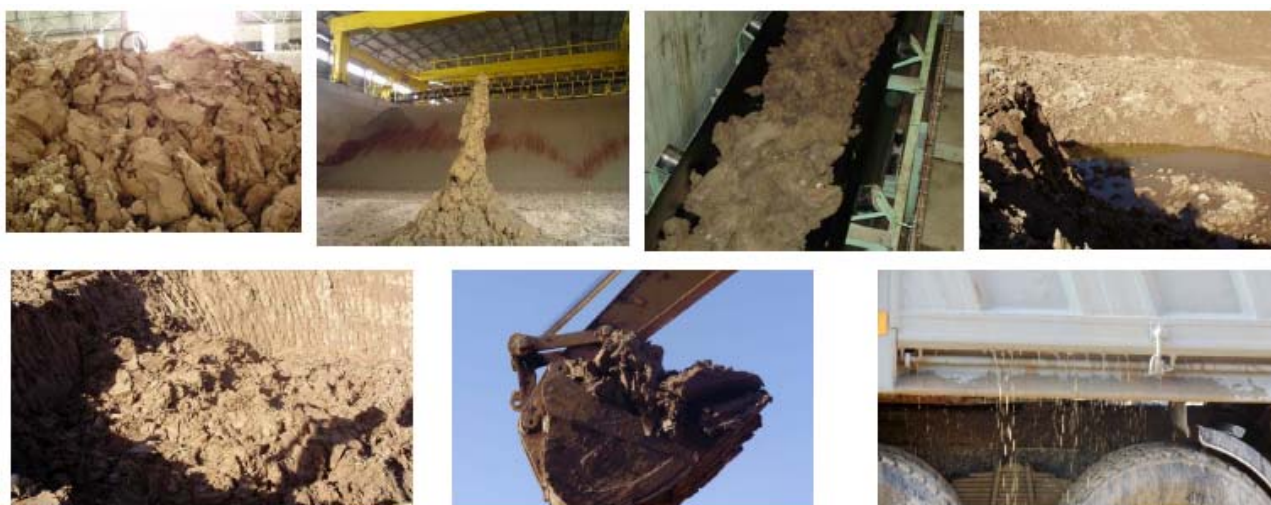


Figura 1.4 Materie prime difficili:

- Carbone e argilla appiccicosa;
- Materiali altamente abrasivi come clinker, calcare, minerale di ferro, coke di petrolio, grano, fertilizzanti minerali;
- Materiali leggeri speciali come i chips o i pellets di legno, o carbone di tipo ATEX.

Generalmente, nell'industria estrattiva e mineraria, per arrivare alla materia prima necessaria in diversi processi industriali, possiamo distinguere le seguenti fasi:

1. l'esplorazione delle risorse minerali che comprende tutte le informazioni di natura geologica già note, telerilevamenti, test geofisici e geochimica, analisi dei campioni e gli studi di fattibilità;
2. la fase di sviluppo in cui si realizza la modellazione del giacimento;
3. l'estrazione dove si seleziona la tecnica più adeguata;
4. il trasporto del materiale estratto;
5. la preparazione della materia prima in cui il materiale viene frantumato e macinato con lo scopo di ottenere particelle di dimensioni molto piccole per poter garantire un recupero ottimale delle specie minerali necessarie.

Le macchine prodotte della Bedeschi Spa riguardano le ultime due fasi: la movimentazione e la riduzione della dimensione del minerale ed in questo elaborato faremo riferimento ad un impianto di frantumazione che lavora un materiale appiccicoso in condizioni ambientali molto particolari.

Un frantumatore, fondamentalmente, è composto da una forte struttura in acciaio e due rulli dentati con l'albero di trasmissione realizzato in acciaio 39NiCrMo4. Le pareti laterali, di lamiera di acciaio di grosso spessore, opportunamente nervate, sono solidali alle pareti di testa su cui sono posizionati i cuscinetti degli alberi, formando in questo modo un telaio molto rigido, adatto a reggere le sollecitazioni che si generano durante il servizio. I dischi rotorici che compongono i due rulli dentati sono protetti di fronte con un materiale resistente all'usura, mentre i denti sono parte integrante dei rotorici, garantendo in questo modo una elevata robustezza con una forma particolarmente adatta a schiacciare grandi blocchi di materiale. I due alberi rotorici sono montati su cuscinetti autoallineanti funzionano a velocità diversa essendo azionati da due gruppi di motorizzazione indipendenti, uno per ciascun rotore, formati da un motore elettrico, un giunto e un riduttore epicicloidale. I gruppi di motorizzazione sono montati su supporti dotati di guide scorrevoli e dispositivi per il tensionamento delle cinghie trapezoidali. La pulizia rulli è effettuata da un gruppo di raschietti montati su tutta la lunghezza di ciascun rotore. Un giunto idraulico rilevatore di velocità protegge ciascun rotore in caso di sovraccarichi accidentali.



Figura 1.5 Rulli dentati del frantumatore - principio di funzionamento.

L'impianto completo comprende, oltre al frantumatore stesso, un sistema di carico molto simile ad un cingolo ed un sistema di scarico composto da una tramoggia che alimenta un nastro trasportatore.

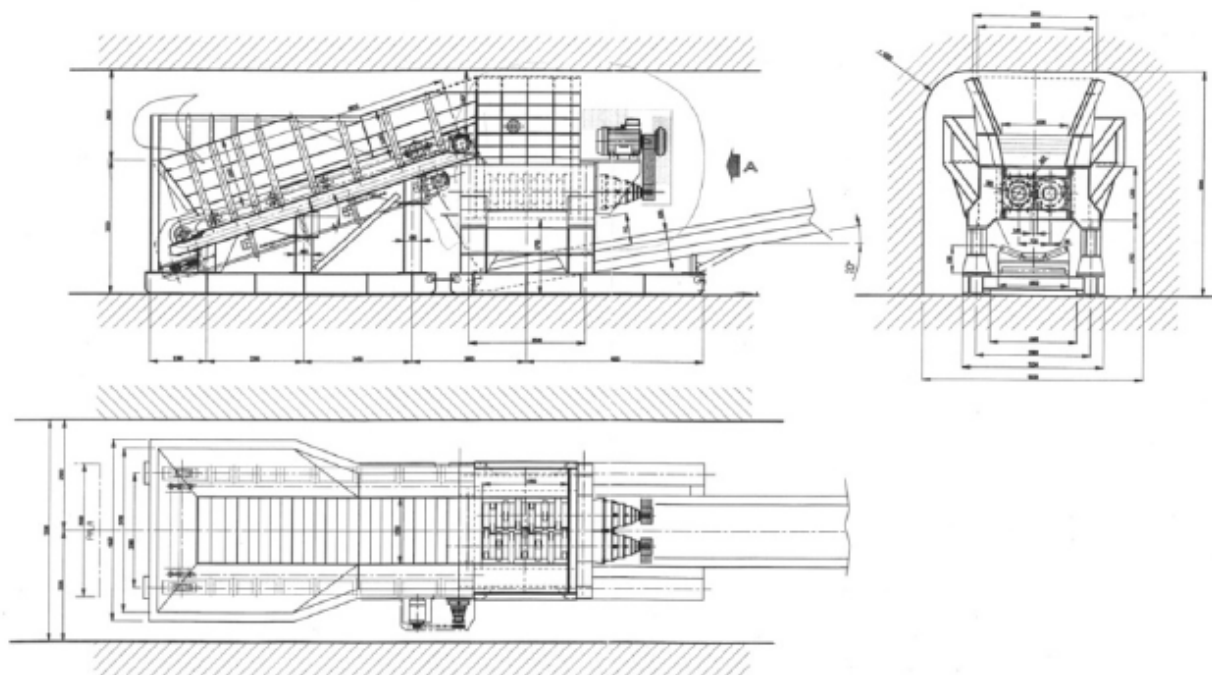


Figura 1.6 Rappresentazione schematica dell'impianto di frantumazione.

Nei primi mesi del 2012, durante le prove effettuate nel cantiere di Shurovski Cement – Russia, si osserva il blocco del sistema di scarico: il materiale particolarmente appiccicoso rimane attaccato alle pareti della tramoggia che si riempie con il materiale macinato formando un ponte naturale sopra il nastro trasportatore. Una delle soluzioni possibili a questo problema è di trovare un materiale adatto per rivestire la tramoggia in modo da permettere il suo svuotamento e rendere funzionale l’impianto e sarà l’oggetto di studio del presente elaborato.



Figura 1.7 Crushing group RL650/2200 sul cantiere di Shurovski Cement – Russia.

La scelta di un materiale specifico per un uso particolare è un processo molto complesso. Tuttavia, la scelta si può semplificare se i parametri operativi, i processi di produzione, i requisiti funzionali e le considerazioni sui costi sono note.

Ci sono migliaia e migliaia di materiali disponibili ed è molto difficile per un’ingegnere possedere una conoscenza dettagliata di tutti i materiali. Inoltre, ci sono esigenze di progettazione mutevoli come, per esempio, il costo, la sicurezza, l’estetica così come l’impatto ambientale e la riciclabilità.

Quando si parla di scelta del materiale per un componente si deve tener conto di molti fattori che possono essere suddivisi in quattro grandi aree:

1. proprietà del materiale: che riguarda i livelli di prestazione del materiale;
2. il costo e la disponibilità del materiale;
3. il processo produttivo per l'ottenimento del componente;
4. l'ambiente: l'effetto che l'ambiente circostante ha sul componente in servizio, l'effetto che il componente ha sul medio circostante e l'effetto che il processo di produzione ha sul ambiente.

Il materiale frantumato è un agglomerato congelato molto appiccicoso composto dal minerale di base (pirite, bauxite, sabbia, ceneri pesanti e volatili), additivi (gesso, varie impurità), calcare, clinker e argilla e, quindi, per quanto riguarda i livelli di prestazione possiamo affermare sin dal principio che il coefficiente di frizione sarà determinante nella scelta del nostro materiale, mentre la resistenza all'usura ed all'indentazione saranno considerate solo come caratteristiche secondarie. L'unico obiettivo di un'azienda è il guadagno economico: il costo e la disponibilità del materiale avrà, dunque, un'importanza da non trascurare. Il processo produttivo per l'ottenimento del rivestimento non impone vincoli particolari in quanto la scelta sarà indirizzata su un materiale già esistente in quanto ci sono vincoli temporali per la consegna del impianto. Le condizioni ambientali particolari (l'escursione termica annua parte da un minimo di -35°C durante il periodo invernale per arrivare ad un massimo di +40°C durante l'estate) richiedono una buona stabilità termica del rivestimento che si traduce in un basso coefficiente di espansione termica.

Material	:	frozen agglomerations of: - corrective (pyrite, bauxite, sand, bottom ash, fly ash) - additives (gypsum, slag) - limestone - clinker - clay
Bulk density	: t/m	1,4
Moisture	: %	up to 30
Capacity	: t/h	450
Inlet size	: mm	90% < 300 mm 100% < 800 mm
Outlet size	: mm	95% < 100 mm 100% < 150 mm
Max. possible pressure on the ground	: kg/cm ²	1,25

Figura 1.8 Dati tecnici riguardanti la composizione e le caratteristiche della materia da manipolare.

Plant site location

Country / city	Russia / Shurovo (Kolomna)
Altitude above sea level	approx. 130 m

Meteorological data

Ambient temperature	maximum	+ 40 °C
	Minimum	- 35 °C
	Annual average	+ 5 °C
Rainfall	Yearly average	1113 mm/year
	Maximum per day	219 mm/day
Civil design	Snow reference load	126 kg/m ² SNiP 2.01.07-85*
Wind	Normative wind load	23 kg/m ² SNiP 2.01.07-85*
	Prevailing wind direction	mainly S (E, SE, S, SW, W)

Figura 1.9 Dati riguardanti la posizione geografica dell'impianto e le condizioni ambientali di esercizio

Riassumendo, il materiale scelto per il rivestimento della tramoggia deve avere:

1. un coefficiente di attrito basso rispetto al materiale con il quale viene a contatto (nel nostro caso l'agglomerato descritto anteriormente);
2. un costo relativamente basso (ben proporzionato alla funzione svolta ed al costo complessivo dell'impianto);
3. una buona resistenza all'indentazione, cioè una durezza abbastanza elevata;
4. una buona resistenza all'usura;
5. un basso coefficiente di dilatazione termica.

Capitolo 2

Fondamenti teorici

Le superfici costituiscono la parte fondamentale dei pezzi che determinano le proprietà di contatto, attrito, usura dei componenti e la loro vita.

Mentre lo stato e il materiale del corpo determina le proprietà medie di un pezzo, la superficie può essere differente e influenza molte delle caratteristiche del manufatto:

- l'attrito e l'usura del pezzo sia nel suo contatto con stampi e utensili nella lavorazione, sia nel suo uso finale;
- l'efficacia dei lubrificanti sia nella lavorazione che in servizio;
- l'apparenza del pezzo e le caratteristiche geometriche nonché il loro ruolo nelle operazioni di: verniciatura, saldatura, rivestimento, giunzione e incollaggio;
- la propagazione di cricche dalla superficie o originate da difetti superficiali;
- la trasmissione di calore e elettricità nei contatti.

Le caratteristiche della superficie rientrano sotto il nome di tessitura della superficie e si classifica in base alla quantità di cricche e fessure (rientrano in queste irregolarità come graffi, cricche, buchi, depressioni, scalini e inclusioni), in base alla direzionalità (la direzione predominante della morfologia superficiale), in base all'ondulamento (regolare deviazione dalla planarità similmente alle onde nell'acqua, caratterizzate in termini di frequenza e altezza delle onde; l'ondulazione può essere causata da vibrazioni, deflessioni, fluttuazioni di forze, temperature o lubrificazione periodiche ed in base alla rugosità (deviazione irregolare dalla planarità sulla scala micron).

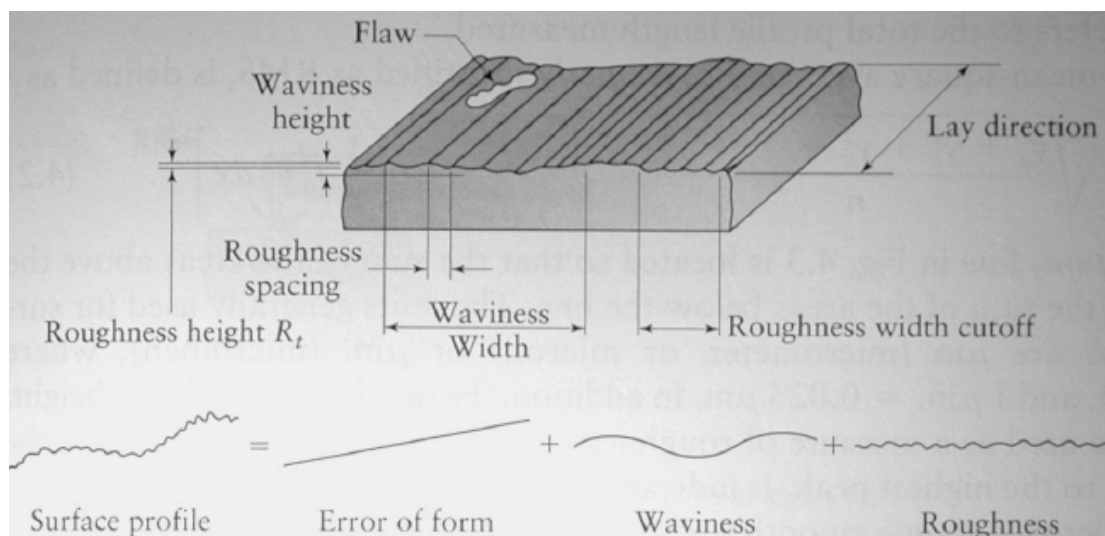


Figura 2.1. Rappresentazione schematica della rugosità

L'attrito e l'usura come la lubrificazione entrano sotto il termine generale di tribologia e sono fenomeni superficiali. Nei processi produttivi l'attrito influenza le forze, le potenze in gioco, i consumi e la qualità dei pezzi mentre l'usura modifica le superfici e le geometrie degli stampi e degli utensili determinando la costanza e la qualità delle geometrie prodotte.

2.1. Attrito

L'attrito è definito come la resistenza allo slittamento relativo di due superfici a contatto tramite sforzo normale alla superficie ed influenza i processi di lavorazione in quanto è un processo dissipativo, che genera calore e può impedire, rallentare o limitare i movimenti degli utensili o stampi.

Non sempre l'attrito è negativo. Senza attrito non potremmo avere ne la laminazione ne ad esempio il movimento tramite ruote di un'automobile. Esistono diverse teorie per descrivere l'attrito, ma l'unica cosa importante è che riescano a descriverne il comportamento in condizioni differenti e tutti gli effetti.

L'attrito o la forza d'attrito è una forza dissipativa che si esercita tra due superfici a contatto tra loro e si oppone al loro moto relativo. La forza d'attrito che si manifesta tra superfici in quiete tra loro è detta di attrito statico, tra superfici in moto relativo si parla invece di attrito dinamico.

Secondo l'interpretazione classica, esistono tre diversi tipi di attrito: attrito radente, attrito volvente e attrito viscoso.

2.1.1. Attrito radente

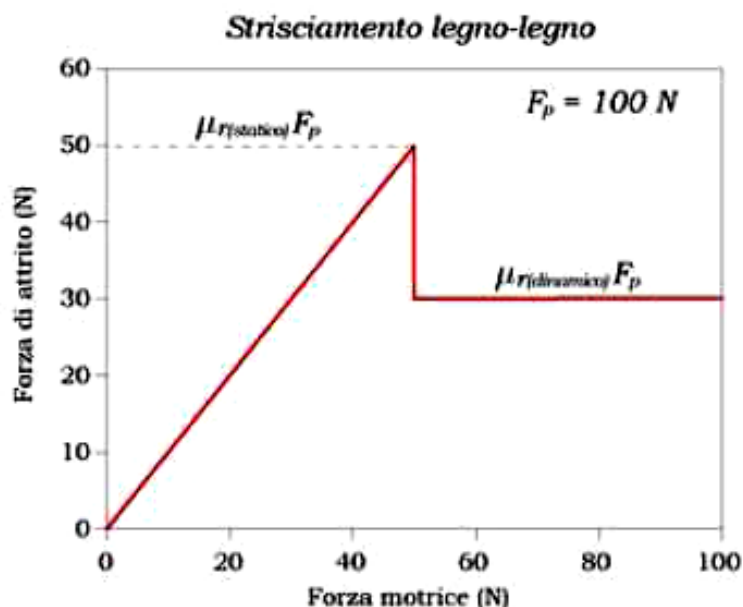


Figura 2.2. Diagramma forza motrice vs. forza di attrito.

Nel grafico del valore della forza di attrito radente in funzione della forza applicata presentato sopra si nota il passaggio da attrito statico ad attrito dinamico, coincidente con l'inizio del moto del corpo.

L'attrito radente è dovuto allo strisciamento (ad esempio, l'interazione tra due superfici piane che rimangono a contatto mentre scorrono l'una rispetto all'altra). Ci sono diverse interpretazioni sulle cause di questa forza: la meccanica galileiana proponeva come causa dell'attrito radente le asperità tra le superfici a contatto mentre studi più recenti hanno invece dimostrato che l'attrito radente è generato soprattutto dai legami chimici che si stabiliscono tra le molecole che compongono le superfici a contatto dovuti alle forze di adesione e di van der Waals.

La forza di van der Waals è un tipo di debole attrazione intermolecolare causata da dipoli (sistema composto da due cariche elettriche uguali e opposte di segno; è uno dei più semplici sistemi di cariche che si possano studiare e rappresenta inoltre l'approssimazione basilare del campo generato da un insieme di cariche globalmente neutro tramite lo sviluppo in multipoli di quest'ultimo) molecolari indotti ed il nome viene dal fisico olandese Johannes Diderik van der Waals che osservò deboli forze attrattive dovute a perturbazioni della nuvola elettronica nei gas nobili.

Molecole complessivamente neutre sono soggette ad un'interazione elettrostatica, dovuta a fluttuazioni nella distribuzione delle cariche. Si tratta di forze attrattive "a lungo raggio" e repulsive "a corto raggio". Maggiori sono le dimensioni delle molecole di gas, maggiori sono queste forze, dato che aumenta il numero di elettroni che possono essere perturbati per formare dipoli indotti. Insieme al legame idrogeno queste forze sono responsabili dell'esistenza, a differenti temperature, dei tre stati di aggregazione della materia.

L'adesione e la coesione sono l'insieme dei fenomeni fisico-chimici che si producono nell'attrazione molecolare tra due materiali di natura differente posti a contatto. Mentre il termine "adesione" fa riferimento all'azione di attrazione tra molecole di tipo differente, il termine "coesione" fa riferimento all'azione di attrazione tra molecole di tipo eguale. Nel caso dell'acqua, per esempio, con il termine "coesione" si indica la capacità delle molecole d'acqua di aggregarsi in gocce (grazie ai legami idrogeno), mentre l'adesione indica la capacità delle gocce d'acqua di rimanere "attaccate" alla superficie verticale di un contenitore (ad esempio una bottiglia) senza scivolare via.

La teoria adesiva dell'attrito considera che la forza tangenziale F necessaria per mantenere una velocità di strisciamento v , tra due corpi a contatto con una forza normale N , origina dalla forza di taglio necessaria a separare le asperità a contatto.

Il coefficiente di attrito è definito come

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{\tau A_r}{\sigma A_r} = \frac{\tau}{\sigma}$$

dove A_r rappresenta l'area di contatto reale.

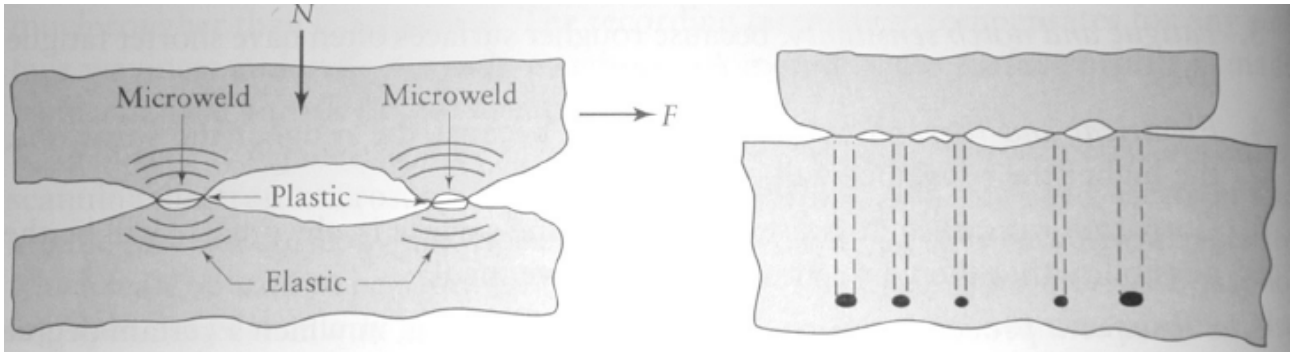


Figura 2.3. Illustrazione schematica delle microsaldature.

Per forze di contatto leggere e grandi aree di contatto lo sforzo normale alle asperità è principalmente elastico. Incrementando il carico, lo sforzo aumenta e si può avere deformazione plastica nelle giunzioni. Aumentando lo sforzo, aumentano le asperità in contatto: alcune di loro sotto deformazione elastica, altre sotto deformazione plastica. Il contatto di queste asperità crea un legame adesivo; tali contatti vengono anche chiamati microwelds (microsaldature). L'adesione dipende dalle proprietà fisiche, chimiche e meccaniche delle due superfici. Più pulita è la superficie maggiori saranno i legami adesivi.

Considerando che sulle asperità si abbia deformazione plastica, lo sforzo normale è pari allo sforzo di snervamento. Poiché un'asperità è circondata dalla massa del materiale, lo sforzo normale è equivalente alla durezza:

$$\mu = \frac{\tau}{durezza}$$

Bassi coefficienti di attrito si ottengono con interfacce deboli, che richiedono quindi uno sforzo di taglio inferiore, ma anche con durezza elevate. Quindi il risultato migliore si ottiene mettendo un film con basso sforzo di taglio su un substrato molto duro. Questo viene fatto con i lubrificanti.

Il coefficiente d'attrito è una grandezza adimensionale e dipende dai materiali delle due superfici a contatto e dal modo in cui sono state lavorate. Esso corrisponde al rapporto tra la forza di attrito tra due corpi F e la forza che li tiene in contatto N .

superfici	μ_s	μ_d
Legno su legno	0,25 – 0,50	0,20
Acciaio su acciaio	0,74	0,57
Acciaio su alluminio	0,61	0,47
Acciaio su ottone	0,51	0,44
Acciaio su teflon	0,04	0,04
Acciaio su ghiaccio	0,027	0,014
Acciaio su aria	0,001	0,001
Rame su vetro	0,68	0,53
Vetro su vetro	0,9 – 1,0	0,4
Teflon su teflon	0,04	0,04
Gomma su asfalto asciutto	1,0	0,8
Gomma su asfalto bagnato	0,7	0,6
Legno sciolinato su neve	0,10	0,05

Considerando un piano inclinato con un angolo di inclinazione α rispetto all'orizzontale come in figura sotto si può dedurre facilmente che il valore massimo che il coefficiente d'attrito possa raggiungere per avere moto.

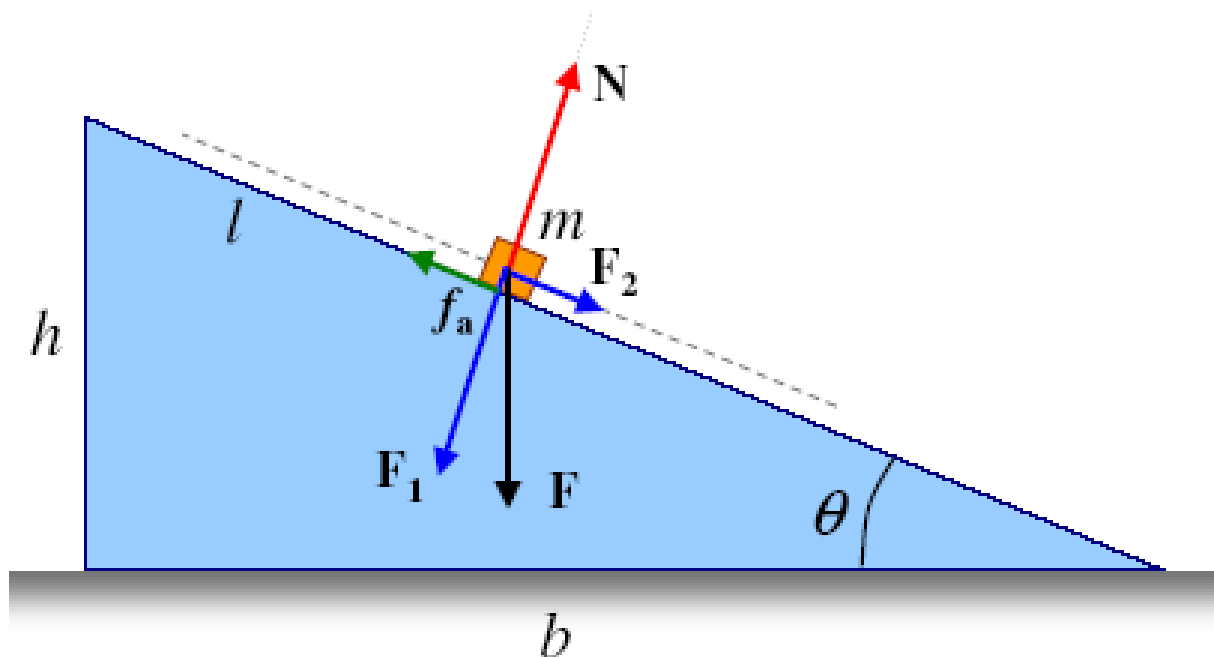


Figura 2.4. Forze sul piano inclinato.

In caso di uguaglianza delle forze in gioco il corpo è in stato di riposo o di moto rettilineo ed uniforme:

$$F_1 = \mu_r F_2$$

$$m g \sin\alpha = \mu m g \cos\alpha,$$

dove "m" rappresenta la massa del corpo

$$\mu = \tan \alpha$$

Il coefficiente di attrito statico μ_{rs} è sempre maggiore o uguale al coefficiente d'attrito dinamico μ_{rd} per le medesime superfici. Dal punto di vista microscopico, esso è dovuto alle forze di interazione tra gli atomi dei materiali a contatto. Questo implica che la forza necessaria al primo distacco (cioè per far sì che i corpi inizino a strisciare) è superiore a quella necessaria a tenerli in strisciamento. Il coefficiente di attrito statico è uguale alla tangente dell'angolo massimo raggiungibile tra le due forze prima che uno dei due corpi cominci a scivolare lungo l'altro (angolo di attrito).

La forza di attrito, definita dalla prima delle due formule scritte sopra, rappresenta la forza di attrito massima che si manifesta nel contatto tra due superfici. Se la forza motrice F_1 è minore di $\mu_{rs}F_2$, allora l'attrito è pari a F_1 e il corpo non si muove; se F_1 supera $\mu_{rs}F_2$ il corpo inizia a muoversi; per valori di F_1 ancora maggiori, l'attrito (dinamico) è sempre costante e pari a $\mu_{rd}F_2$.

2.1.2. Attrito volvente

Il rotolamento di norma è reso possibile dalla presenza di attrito radente statico tra la ruota e il terreno; se questo attrito non ci fosse, o fosse molto piccolo (come nel caso di un terreno ghiacciato), la ruota striscerebbe senza riuscire a compiere un rotolamento puro, nel qual caso entrerebbe subito in gioco l'attrito radente dinamico che si oppone allo slittamento e, riducendo progressivamente la velocità relativa fra i corpi striscianti, tende a ripristinare le condizioni di puro rotolamento. Un caso in cui il puro rotolamento può avvenire senza l'aiuto dell'attrito statico si ha quando una ruota che sta già rotolando su un piano orizzontale viene lasciata a sé stessa: in tal caso l'attrito statico assume il valore zero e solo l'attrito volvente può frenare il rotolamento è tale da ridurre simultaneamente e armonicamente sia la velocità di traslazione sia quella di rotazione della ruota in modo che il puro rotolamento si conservi fino a fine corsa.

Se si applica un momento alla ruota, essa inizia a rotolare senza strisciare fintanto che il momento applicato è minore di $R \times \mu_{rs} \times F$, dove R è il raggio della ruota. Se il momento supera questo valore, la forza motrice applicata alla superficie della ruota supera l'attrito statico massimo e la ruota slitta mentre rotola; è la classica "sgommata" ottenuta accelerando da fermi in modo repentino.

Alcuni valori del coefficiente di attrito volvente.

Superfici	μ_v
Legno - legno	0,005
Acciaio - acciaio	0,06
Gomma - asfalto	0,035
Acciaio - Ghisa	0,05÷0,5
Ghisa - Ghisa	2
Acciaio - Legno	1,5
Pneumatico - Asfalto	5÷10
Ruota ferroviaria - rotaia	0,3÷0,5
Sfere rotolanti (cuscinetti)	0,0025÷0,01

L'effetto dell'attrito volvente si può descrivere spostando leggermente in avanti, nel senso di moto, la reazione vincolare (in genere non perfettamente normale) esercitata dal piano di rotolamento sul corpo rotolante, di modo che tale reazione vincolare abbia non solo una componente contraria al moto traslatorio, ma anche un momento di forza rispetto all'asse di rotazione della ruota che si oppone al moto rotatorio. Una siffatta reazione vincolare è la sintesi schematica del campo di sforzi che sorgono e si distribuiscono sull'intera area di contatto (che non è mai veramente puntiforme o riducibile ad un segmento) tra la ruota e il terreno: la rotazione causa di fatto una deformazione dell'area di contatto e quindi una distribuzione delle forze di pressione, dovute alla forza peso, non uniforme su tutta la superficie di contatto; il risultato di queste interazioni si può riassumere dicendo che il piano di rotolamento esercita sulla ruota una forza vincolare quasi-normale, rivolta verso l'alto e all'indietro rispetto al moto, la cui linea di applicazione di norma non passa per l'asse della ruota, di modo che tale forza produce sia una debole resistenza al moto traslatorio sia un debole momento torcente opposto al senso del rotolamento in atto.

Quantitativamente, questo tipo di attrito è espresso da un'equazione simile alla precedente,

$$F_v = \mu_v F_{\perp}$$

A parità delle altre condizioni, la resistenza opposta dall'attrito volvente è tanto minore quanto maggiore è il raggio di curvatura del corpo che rotola.

Più in generale, il coefficiente di attrito volvente è all'incirca direttamente proporzionale al coefficiente di attrito statico e inversamente proporzionale al raggio della ruota.

2.1.3. Attrito viscoso

Quando un corpo si muove all'interno di un fluido (liquido o gas) è soggetto ad una forza di attrito dovuta all'interazione del corpo con le molecole del fluido. Tale forza di attrito è legata ad un numero adimensionale detto numero di Reynolds:

$$\text{Re} = \frac{2R_s v \rho}{\eta},$$

Per concludere gli effetti dell'attrito sono la dispersione dell'energia meccanica (energia cinetica) in calore, il che riduce il rendimento del movimento, ma in alcuni casi questo attrito, può essere utile, qualora non si cerchi un movimento, ma un'adesione/controllo, soprattutto in ambito stradale, o nelle attività fisiche, permettendo gli spostamenti e azioni che altrimenti non sarebbero possibili, difatti la tenuta stradale e la camminata/passeggiata, sono possibili anche grazie all'attrito con il suolo.

E facilmente dimostrabile attraverso misure sperimentali che il coefficiente d'attrito non cambia al variare delle dimensioni di corpi da cui esso viene ricavato, ma cambia se i due corpi presi in considerazione sono ricoperti da materiali disuguali.

I materiali polimerici hanno bassa resistenza ma anche bassi coefficienti di attrito per cui vengono utilizzati per cuscinetti e ingranaggi (applicazioni dove è richiesto basso attrito); tutto questo perché sono materiali autolubrificanti.

2.2 Usura

L'usura è il processo che porta alla rimozione non voluta e progressiva di materiale dalla superficie ed è molto importante dal punto di vista economico in quanto provoca dei cambiamenti nella forma dei pezzi, degli utensili e stampi. Tante volte la sostituzione di questi è molto onerosa per cui esistono specifici pezzi e piastre da usura fatte in modo da essere rimpiazzati facilmente dopo usura.

L'usura ha anche degli aspetti positivi come la riduzione della rugosità tramite la rimozione delle asperità.

L'usura viene classificata principalmente in quattro tipi: usura adesiva, usura abrasiva, usura corrosiva e usura per fatica.

L'usura adesiva si provoca quando, in seguito ad una forza tangenziale, si può avere deformazione a taglio nella zona di contatto con rottura nella parte più debole e il distacco del pezzo che rimane attaccato alla superficie più dura. La presenza di ossidi sulla superficie riduce l'usura

agendo come un film protettivo e portando ad un'usura lieve risultante in piccole particelle d'usura. Nel caso in cui le due superfici sono pulite e libere da contaminanti si ha usura severa poiché i contaminanti sulla superficie riducono le forze d'adesione e riducono l'usura.

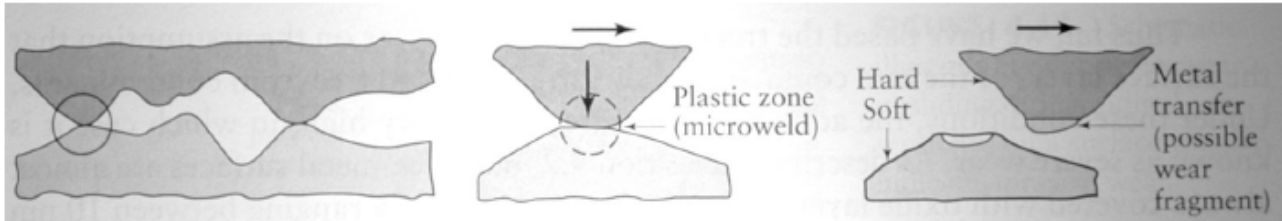


Figura 2.5 Rappresentazione schematica del meccanismo di usura abrasiva.

L'usura abrasiva è causata da una superficie molto dura, con delle asperità, che slitta contro un'altra superficie. In metalli e ceramici la resistenza all'usura abrasiva è direttamente proporzionale alla durezza della superficie. Quindi in genere aumentando la durezza di un materiale si riduce la sua usura abrasiva, per questo vengono utilizzati i rivestimenti duri e trattamenti superficiali.

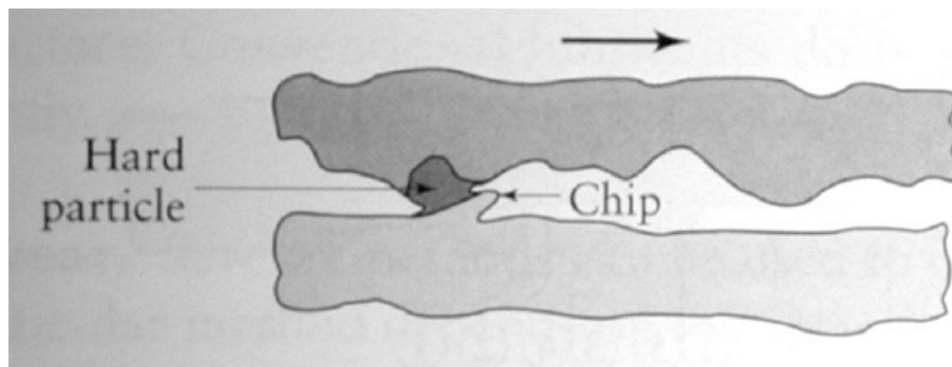


Figura 2.6. Usura a tre corpi.

A sua volta l'usura abrasiva è di due tipi:

- usura a due corpi: o anche usura erosiva, in cui le particelle abrasive sono trasportate da un fluido o in aria;
- usura a tre corpi: il lubrificante tra due superfici contiene particelle abrasive (generate nel tempo) che abradono che è molto frequente nelle lavorazioni meccaniche.

L'usura abrasiva si manifesta con la formazione e rimozione di un detrito tramite una particella dura intermedia e sulla superficie abrasa compaiono tracce evidenti di usura, graffi continui.

L'usura corrosiva è detta anche tribossidativa nel caso di ossidazione e ha luogo in presenza di metalli che si ossidano o corrodono: l'usura abrasiva o adesiva rimuove l'ossido e/o i prodotti di corrosione lasciando libera parte della superficie che si corrode/ossida di nuovo. È maggiore quando sono presenti componenti che aumentano la corrosione come l'acqua (soprattutto l'acqua di mare), acidi, ossigeno, composti chimici e a base di zolfo. L'usura corrosiva può essere ridotta usando materiale meno soggetti a corrosione, riducendo gli inquinanti e la temperatura ambientale.

Nel caso di fatica vengono prodotte delle cricche in superficie che portano a rottura di piccoli pezzi o detriti di usura da fatica e generalmente la rottura avviene per spalling o pitting (a volte accompagnate anche dalla corrosione). E avere fatica meccanica o fatica termica: la fatica meccanica con carichi ciclici tipo nei cuscinetti a sfera mentre nella fatica termica, le cricche sono generate dagli sforzi di contatto dovuti alla differente espansione termica. Le cricche dalla superficie, si uniscono tra loro nel materiale sottostante (cambiando direzione rispetto alla perpendicolare alla superficie) e provocano il distacco del detrito ed è tipica nelle lavorazioni a caldo e stampi per fusione. Per ridurre tale usura bisogna ridurre gli sforzi di contatto, il ciclaggio termico, impurità, inclusioni e difetti locali.

Esistono anche molti altri tipi di usura e combinazioni di usura e raramente l'usura è di un solo tipo: l'erosione in cui le particelle libere abradono una superficie, il fretting (l'usura tra due superfici che si muovono relativamente con piccoli movimenti), l'usura per impatto nella quale l'impatto continuo di altri corpi e particelle rimuove il materiale dalla superficie.

I polimeri sono meno soggetti ad usura per il loro comportamento viscoelastico. Nel caso di usura abrasiva, le gomme ed elastomeri resistono molto bene in quanto si deformano assorbendo le asperità della superficie o particella abrasiva.

I polimeri con una buona resistenza ad usura: poliimmidi, nylon, policarbonato, polipropilene, acetati e polietilene ad alta densità e sono usati anche per la fabbricazione di ingranaggi. Per quanto riguarda i materiali compositi, la resistenza all'usura consiste nell'evitare il pull-out delle fibre ed è maggiore per slittamenti paralleli alla direzione delle fibre. Comunque i compositi hanno una buona resistenza ad usura.

2.3 Dilatazione termica

L'espansione/contrazione termica dei materiali, cioè l'aumento dimensionale al riscaldamento o la diminuzione al raffreddamento, ha risvolti applicativi molto importanti. Gli accoppiamenti tra materiali diversi, le condizioni di vincolo e le tolleranze dimensionali di

componenti meccanici devono essere progettate tenendo conto di questo fenomeno. Il coefficiente di dilatazione termica volumetrica è definito dalla seguente espressione:

$$\alpha_v = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P = - \left(\frac{\partial \ln \rho}{\partial T} \right)_P$$

dove V è il volume specifico e ρ è la densità ($\rho = 1/V$). È molto comune il riferimento al coefficiente di espansione lineare:

$$\alpha = \frac{1}{l} \left(\frac{\partial l}{\partial T} \right)_P = \left(\frac{\partial \ln l}{\partial T} \right)_P$$

Dato un componente di lunghezza l_0 , una variazione di temperatura ΔT si traduce in una dilatazione (se $\Delta T > 0$, o contrazione se $\Delta T < 0$) $\Delta l = l_0 \alpha \Delta T$ dove si osserva che la relazione è approssimata, dato che l'integrazione della precedente equazione differenziale dà $\Delta l = l_0 [e^{\alpha \Delta T} - 1]$. L'approssimazione è valida in quanto il prodotto $\alpha \Delta T$ e l'espressione $[e^{\alpha \Delta T} - 1]$ sono numeri molto piccoli (α ha un'ordine di grandezza tra 10^{-4} e 10^{-7} K^{-1}) o meglio ancora sono infinitesimi: espandendo in serie $e^{\alpha \Delta T} - 1 = \alpha \Delta T + \text{infinitesimi di ordine superiore}$.

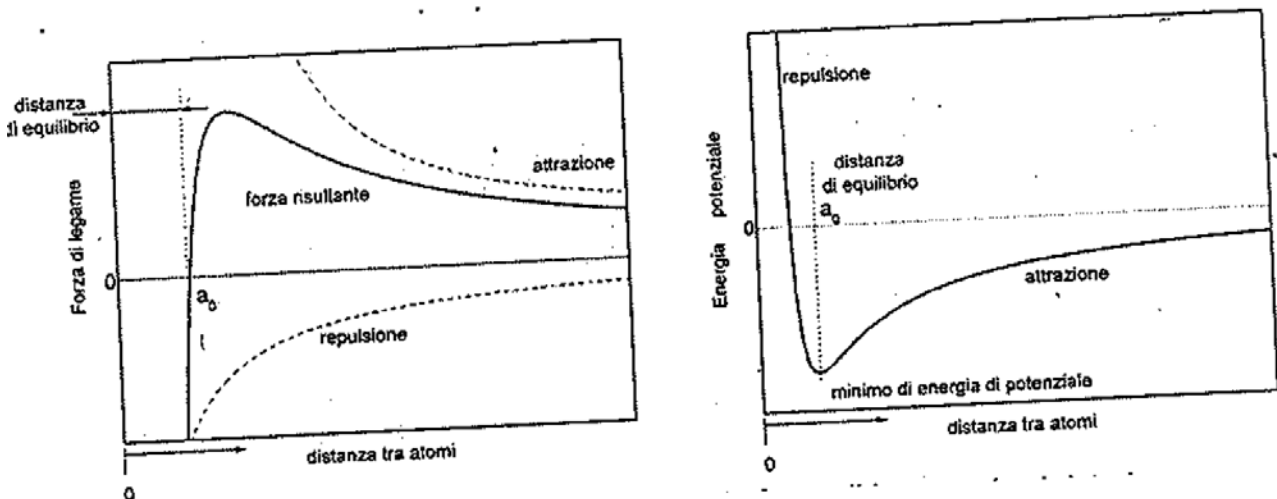


Figura 2.7. Curve Condon – Morse per la forza di legame (a sinistra) e per l'energia di potenziale (a destra).

Il meccanismo fisico dell'espansione termica è legato alla natura del legame chimico. Per distanza di equilibrio tra due atomi legati si intende la distanza alla quale le forze attrattive e repulsive sono bilanciate (hanno la risultante nulla) e se si valuta l'energia potenziale si osserva che essa ha un minimo proprio presso la distanza di equilibrio. Anche se l'energia di un sistema formato da due atomi è minima alla distanza di equilibrio questo non vuol dire che essi si

troveranno permanentemente a tale distanza bensì che il valore della distanza tra i due oscilla attorno ad essa. Teoricamente l'oscillazione viene eliminata al raggiungimento dello zero assoluto (0 K).

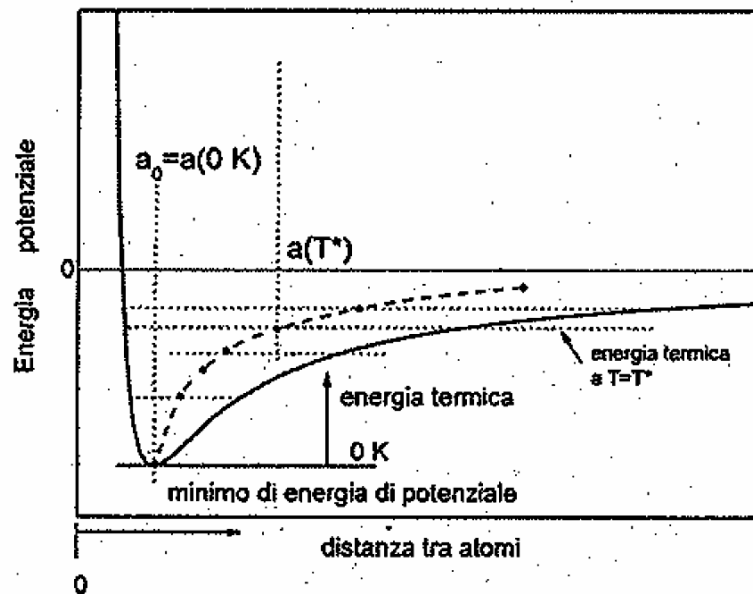


Figura 2.8. Variazione del baricentro di oscillazione attorno alla posizione di equilibrio con l'aumento della temperatura

Il baricentro dell'oscillazione, ovvero la distanza "statistica" tra atomi ad una certa temperatura non coincide strettamente con la posizione di equilibrio: curve di potenziale con la "cunetta" simmetrica danno baricentri di oscillazione praticamente coincidenti con la distanza di equilibrio, mentre curve molto asimmetriche possono dare baricentri di oscillazione tanto più spostati a distanze interatomiche elevate quanto più alta è l'energia termica.

Nel primo caso si ottengono materiali con un coefficiente di dilatazione basso, nel secondo invece l'espansione termica è molto sensibile. Va precisato che il coefficiente di dilatazione è una misura "mediata" su tutti i legami presenti nel materiale e risente della loro distribuzione: non sorprende quindi che i polimeri, soprattutto quelli termoplastici, abbiano coefficienti di dilatazione piuttosto elevati rispetto agli altri materiali ingegneristici poiché la maggior parte dei legami intermolecolari sono di tipo debole (di van der Waals).

Le cariche, ovvero i materiali riempitivi, generalmente hanno coefficienti di dilatazione inferiori alla matrice polimerica. Ne risultano, complessivamente, materiali con una dilatabilità minore ed in più per le cariche fibrose l'orientamento del riempitivo comporta una forte anisotropia nel coefficiente di dilatazione termica pur partendo da polimeri amorfi, ovvero isotropi.

2.4 Durezza e microdurezza

La durezza di un materiale è definita come la pressione di equilibrio che la superficie del solido riesce a sopportare a seguito di una sollecitazione esercitata da un oggetto più o meno appuntito detto indentatore. La geometria che caratterizza l'indentatore determina il particolare tipo di prova di indentazione. Durante la prova l'indentatore penetra nel materiale sotto l'azione di un carico essendo la velocità controllata. La forma e la profondità dell'impronta vengono misurate e si risale alla valutazione della durezza: più larga e profonda è l'impronta minore è la durezza del materiale.

Le misure di durezza determinati sono relativi alla tecnica impiegata e la durezza è correlata allo snervamento dei materiali mediante la:

$$H = 3\sigma_y$$

che nel caso dei materiali che presentano p incrudimento, , necessita di un fattore correttivo, in quanto durante l'indentazione l'incrudimento causa una variazione dello snervamento.

La prova è utile in quanto:

1. Non è distruttiva
2. Sono semplici e poco costose
3. Si possono dedurre altre proprietà meccaniche

La dimostrazione è relativamente semplice. Si consideri un modello bi-dimensionale della formazione di un'impronta nel caso di materiali che non presentano incrudimento: se si pressa un indentatore piatto nel materiale, si registreranno sforzi taglio sui piani a 45° che sono

$$\tau_y = \frac{\sigma_y}{2}$$

se si uguaglia il lavoro compiuto dalla forza F quando l'indentatore penetra di una quantità u al lavoro fatto sui piani di taglio si ha:

$$Fu = 2 \times \frac{A(\sigma_y / 2)}{\sqrt{2}} \times u\sqrt{2} + 2 \times A(\sigma_y / 2) \times u + 4 \times \frac{A(\sigma_y / 2)}{\sqrt{2}} \times \frac{u}{\sqrt{2}}$$

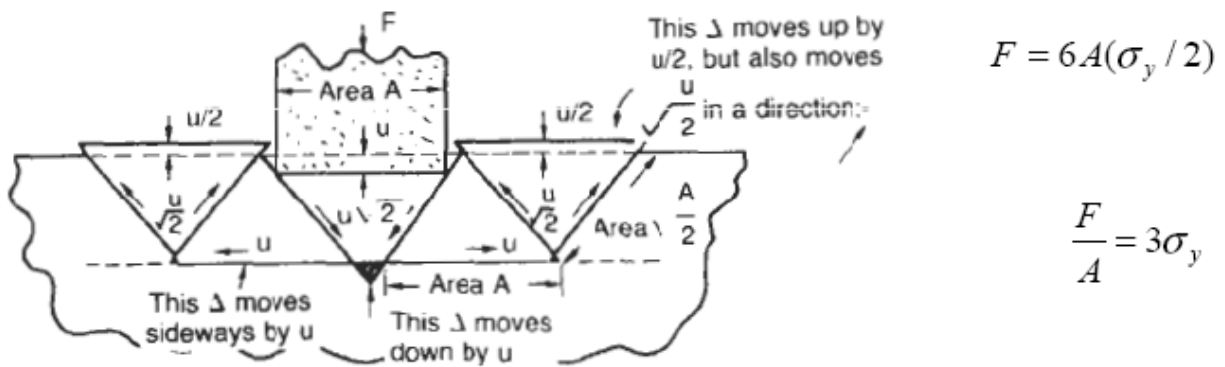


Figura 2.9. Rappresentazione schematica della penetrazione dell'indentatore nel materiale.

2.4.1 Prove di durezza

La durezza si può esprimere in unità Brinell, Vickers o Rockwell a seconda delle modalità con cui viene misurata. Comunque, in tutti i casi la durezza è sempre intesa come resistenza di un materiale alla penetrazione e si misura con dispositivi che permettono di comprimere, applicando un determinato carico, l'indentatore sulla superficie del pezzo. Le prove vanno ripetute, e prove diverse devono essere separate da una distanza almeno pari a 3 volte la dimensione dell'impronta, mentre lo spessore del provino dovrebbe essere pari ad almeno 10 volte la profondità dell'impronta.

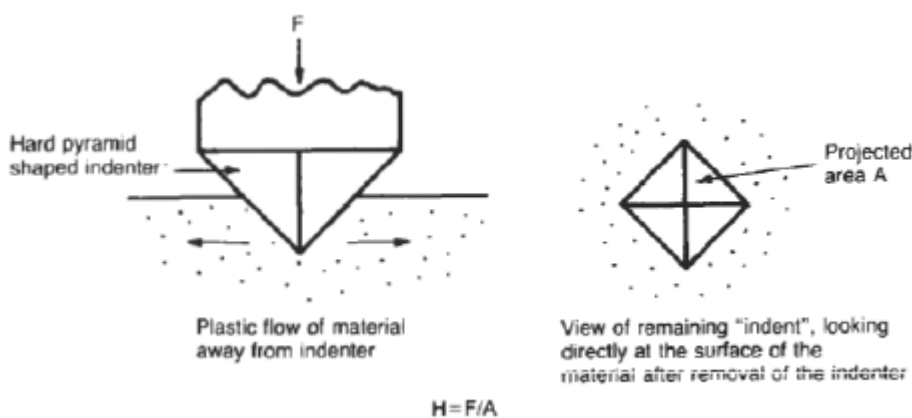


Figura 2.10. Penetratore prismatico.

Prova Rockwell

Il penetratore è sferico o cono di diverse dimensioni, materiali (acciai e diamante) e si possono applicare diversi carichi:

- 60kg – scala Rockwell A per materiali teneri, quali sono i polimeri
- 100kg – scala Rockwell D
- 150kg - scala Rockwell C per materiali duri, quali ad esempio gli acciai temprati

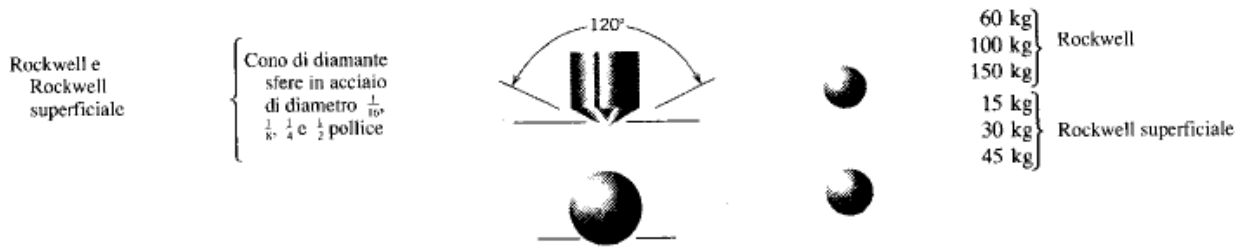


Figura 2.11. Penetratore sferico.

La prova è adatta per tutti i metalli, le leghe e le plastiche dure. La misura si basa sulla differenza di profondità delle impronte lasciate dall'imposizione di 2 carichi successivi uno inizialmente basso e uno poi maggiore. A seconda dell'entità dei due carichi imposti si ha la durezza Rockwell e la Rockwell superficiale. La misura dura meno di 10 sec e non necessita di misura dell'impronta, però necessita di una superficie liscia del campione.

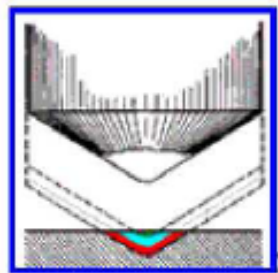


Figura 2.12. Meccanismo di formazione dell'impronta.

Prova Brinell

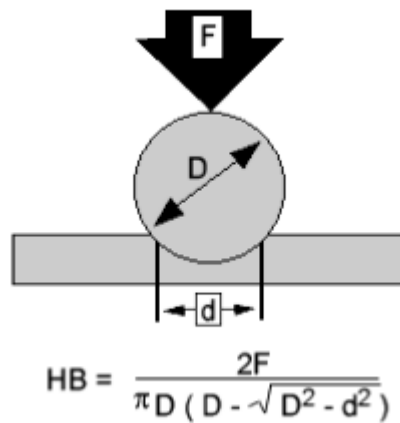
La misura si effettua per determinare la durezza di metalli forgiati e castings che presentano struttura troppo grande per effettuare la durezza Rockwell e Vickers e si possono testare quasi tutti i metalli variando la dimensione del penetratore (una sfera di acciaio o di carburo di tungsteno WC)



Figura 2.13. Calcolo della durezza funzione della dimensione dell'impronta.

La prova prevede:

1. l'indentatore venga premuto con una forza nota sulla superficie del materiale per circa 10 sec
2. Si misura quindi la dimensione dell'impronta lasciata.



Nella scala Vickers (HV) l'indentatore è un diamante a base piramidale ed i carichi applicati sono molto inferiori rispetto al caso precedente e vanno da 1g a 1kg. L'impronta si osserva poi al microscopio e si misura la diagonale dell'impronta.



Figura 2.14. Geometria del penetratore per la scala Vickers.

Per effettuare questa prova la superficie del provino deve essere accuratamente preparata. La prova di durezza Vickers è indipendente dalla forza, ovvero se il materiale è uniforme, i valori di durezza Vickers sono gli stessi indipendentemente dal valore della forza impressa all'indentatore perché non è il rapporto tra la forza e l'area lasciata, ma tra la forza e l'area dell'indentatore.

Microdurezza Knoop

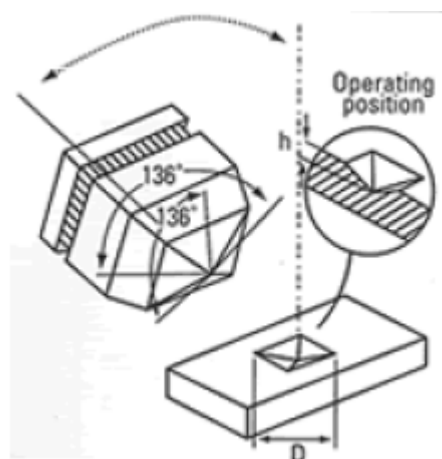


Figura 2.15. Indentatore per la scala Knoop.

La forma dell'impronta è rombica, l'indentatore è in diamante e il carico applicato varia da 26g a 5kg.

Capitolo 3

Criteri di selezione di un materiale

3.1 Presentazione generale

Abbiamo visto alla fine del primo capitolo che il nostro materiale deve avere un basso coefficiente di frizione rispetto al materiale con il quale viene a contatto, un costo relativamente basso, una buona resistenza all'usura e all'indentazione ed anche una buona stabilità termica. Ma prima di cominciare con la scelta effettiva, vale la pena spendere qualche parola sul sia modo in cui si sceglie un materiale ma anche sugli errori e sul uso incorretto dei dati a disposizione che i progettisti fanno spesso.

La selezione di un materiale non deve essere basata esclusivamente sul costo, per cui è necessario un approccio sistematico nel processo di selezione per poter selezionare il materiale migliore per qualsiasi applicazione. La tecnica corretta nella selezione del materiale comporta un'attenta definizione dell'esigenza applicativa in termini di sollecitazione meccanica e termica, di condizioni ambientali, dell'azione di campi elettromagnetici o di agenti chimici. Tante volte è preferibile utilizzare un materiale più costoso, con caratteristiche specifiche superiori, in una minore quantità dando al prodotto finito maggior resistenza e minor peso.

Alcune aziende fornitrici di materiali hanno sviluppato dei software per rendere più agevole la scelta del materiale scegliendo semplicemente un'esigenza di applicazione nell'ordine di importanza; il processo di selezione inizia con un'attenta definizione dei requisiti e restringendo le scelte eliminando una ad una quelle inopportune.

Il progettista deve individuare tutti i requisiti del materiale a seconda del suo utilizzo e stabilire anche un ordine di importanza soprattutto nel caso si tratti di caratteristiche concorrenti: devono essere individuati tutti i tipi di stress ai quali verrà sottoposto il materiale durante il suo esercizio, (meccanici, termici, condizioni ambientali, agenti chimici) ed il loro evolvere nel tempo (esposizione ai raggi UV, fatica, creep, rilassamento). Nella selezione del materiale appropriato un ruolo chiave è detenuto dalle tecniche di fabbricazione e di montaggio del prodotto finale.

In particolar modo le materie plastiche sono suscettibili all'attacco chimico e quindi il comportamento sotto l'aggressione degli agenti chimici diventa una considerazione fondamentale. Una singola proprietà non può definire il comportamento di un materiale in un dato ambiente chimico o sotto l'azione di altri fattori esterni di tipo meccanico, oppure la durata dell'esposizione, temperatura e la concentrazione degli agenti chimici. Uno degli errori più comuni nella selezione e

quello di basarsi solamente sui dati forniti dal produttore accettando ciecamente le indicazioni presenti nella scheda tecnica del prodotto.

Al fine di assistere i progettisti nel processo di selezione del materiale i fornitori mettono nella scheda tecnica i seguenti dati:

- resistenza alla trazione e modulo;
- resistenza alla flessione e modulo;
- resistenza agli urti;
- resistenza alla compressione;
- resistenza alla fatica;
- resistenza al creep;
- rilassamento delle tensioni.

Devono essere valutati attentamente i dati a breve termine (valori istantanei determinati con prove di laboratorio su provini standardizzati) per un confronto rapido e lo screening dei candidati mentre i dati a lungo termine (fatica, creep, rilassamento) sono decisivi nella scelta finale. Le curve di creep e di rilassamento devono essere analizzate su tutta la gamma di temperature di utilizzo, mentre le curve isocrone sforzo-deformazione sono molto utili per confrontare materiali diversi sulla stessa base di tempo. Per quanto riguarda la resistenza all'impatto bisogna tener conto che i valori crollano quando la temperatura del medio circostante si abbassa considerevolmente. Generalmente il coefficiente di espansione termica delle materie plastiche è da sette a dieci volte più grande rispetto ai materiali convenzionali come i metalli, il legno o la ceramica, per cui nel caso di accoppiamento della plastica con altri materiali le variazioni di temperatura possono sviluppare tensioni interni e causare la distruzione prematura del rivestimento.

Una delle considerazioni più importanti nella scelta di un materiale è la sua resistenza agli agenti chimici e dipende dalla natura della sostanza con cui viene a contatto, dal tempo di contatto, dalla temperatura del medio circostante e dallo stato tensionale presente nel manufatto. Come regola generale un alto grado di cristallinità rende un polimero più resistente all'attacco degli agenti chimici. L'esposizione chimica delle parti in plastica può portare a degrado fisico come screpolature, rammollimento, gonfiore, alterazione del colore accompagnato dalla perdita delle proprietà meccaniche.

Le considerazioni ambientali comprendono l'esposizione ai raggi UV, IR, X, alta umidità, condizioni meteorologiche estreme, l'inquinamento da prodotti chimici industriali, microrganismi, batteri, funghi e muffe. L'effetto combinato di vari fattori può essere molto più grave rispetto a quello prodotto da ogni fattore in parte e molte volte il processo di degradazione viene accelerato. È molto importante capire se i valori ottenuti nei test e riportati nella scheda del prodotto includono

gli effetti sinergici dei vari fattori ambientali sempre presenti nelle situazioni di vita reale. La scelta del materiale non deve essere guidata soltanto dal costo, l'approccio più logico prevede la scelta di tre o quattro candidati migliori dal punto di vista delle prestazioni e selezionare uno di loro con considerazioni di carattere economico.

Non si devono dimenticare anche le considerazioni di elaborazione come il tipo di processo di fabbricazione, le operazioni secondarie e l'assemblaggio dei componenti.

Cedimenti e rotture derivanti da una scelta frettolosa del materiale sono molto più frequenti nel caso delle materie plastiche che in tutti gli altri settori. Bisogna essere ben specificato se il materiale deve essere resistente agli urti oppure se sarà utilizzato all'esterno (esposto ai raggi UV) per un periodo abbastanza lungo. Per questo è necessaria una conoscenza approfondita delle materie plastiche, dei metodi e delle condizioni di testing per capire il giusto significato dei valori ottenuti. I materiali plastici sono viscoelastici, cioè si comportano come se fossero una combinazione di solidi elastici e fluidi viscosi. Questo significa che l'applicazione di una sollecitazione produce in essi una deformazione che è il risultato dell'azione combinata nel materiale di elementi elastici e di elementi viscosi e genera a sua volta una dipendenza non lineare sforzo – deformazione. È proprio questa dipendenza non lineare tra il carico esterno applicato e la deformazione prodotta che rende possibile la comprensione del creep, del rilassamento delle tensioni e del comportamento a fatica a differenza dei materiali tradizionali come i metalli, la ceramica e il legno. La viscoelasticità potrebbe essere definita anche come la tendenza di combattere gli stress.

3.2 Scelta preliminare

Ci proponiamo di procedere con la selezione del materiale in due fasi distinte: nella prima fase saranno eliminati uno ad uno tutti i materiali non idonei allo svolgimento del ruolo richiesto, mentre nella seconda fase verrà selezionato il candidato migliore da un gruppo di quattro, tra i più vicini alle caratteristiche del materiale ideale.

Alla fine del primo capitolo abbiamo visto l'utilizzo del nostro materiale, sono stati individuati tutti i fattori di stress durante l'esercizio, le condizioni ambientali difficili di lavoro e stabilito anche l'ordine di importanza delle caratteristiche richieste:

6. coefficiente di attrito basso rispetto al materiale con il quale viene a contatto;
7. costo relativamente basso;
8. buona resistenza all'usura;
9. buona resistenza all'indentazione, cioè durezza elevata;
10. basso coefficiente di dilatazione termica.

La scelta sarà vincolata da un unico parametro: l'angolo di inclinazione della tramoggia che nel nostro caso è di 45° . In più, possiamo specificare che il materiale non verrà esposto all'attacco di agenti chimici aggressivi, ai raggi UV e non esistono particolari esigenze neanche per quanto riguarda il processo di fabbricazione e l'assemblaggio dei componenti.

3.2.1 Prima fase

Per eliminare i materiali inopportuni abbiamo proceduto in una maniera estremamente semplice, veloce ed efficace: è stato costruito un piano inclinato con lo stesso angolo di inclinazione della tramoggia di 15° con la possibilità di sostituire la superficie di scorrimento sul quale veniva lasciato un provino – un mattone di oltre 15kg di forma quasi cubica, ben compattizzato, composto da sabbia, argilla, calcare e quarzo, con una finitura superficiale non tanto ruvida e abbondantemente bagnato. La scelta del provino, per approssimare al meglio le condizioni reali, è stata fatta in base a tre semplici considerazioni: il peso relativamente elevato pensando alla pressione esercitata nel caso della tramoggia piena, la finitura superficiale poiché si tratta in realtà di materiale non compatto e bagnato in quanto la miscela reale non è secca.

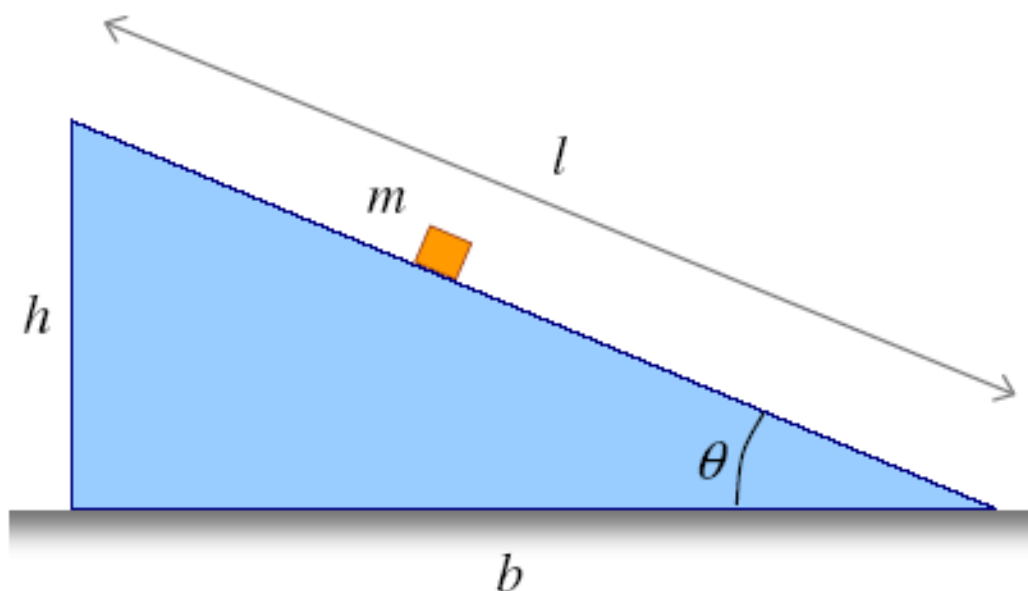


Figura 3.1 Illustrazione schematica del dispositivo realizzato per la verifica di alcuni materiali a disposizione: un piano inclinato di lunghezza conosciuta “ l ” e l’altezza regolabile “ h ”.

I risultati ottenuti alla fine della verifica sono sintetizzati nella tabella seguente:

No	Materiale	Scorrimento Si/No
1	acciaio verniciato	No
2	legno verniciato	No
3	alluminio	No
4	plexiglas (PMMA)	Si
5	ottone	No
6	teflon (PTFE)	Si
7	tappeto in gomma	No

Da come facilmente si può osservare abbiamo escluso a priori dalla verifica il legno, il vetro e le schiume. Analizzando la tabella possiamo dire quasi con certezza che il nostro materiale sarà un polimero termoplastico. Vediamo quale.

Per la verifica degli altri requisiti faremo uso dei diagrammi di Ashby dei quali daremo in seguito una breve descrizione. I grafici dei materiali mappano le aree coperte dalle proprietà di ciascuna classe di materiali. Essi possono essere usati in due modi:

- (a) per ricavare valori approssimati delle proprietà di un materiale;
- (b) per scegliere materiali dotati di profili predeterminati di proprietà.

In maniera analoga, la raccolta dei grafici relativi ai processi possono essere usati come una fonte di dati o come uno strumento di selezione. L'uso in sequenza di vari grafici permette di conseguire simultaneamente vari obiettivi del progetto.

La maniera migliore di affrontare problemi di scelta è di operare direttamente con i grafici appropriati. Non è possibile tracciare grafici che tengano conto di tutte le combinazioni possibili, che sono troppo numerose.

I dati dei grafici e delle tabelle sono approssimati: essi caratterizzano ciascuna classe di materiali (ad es. acciai inossidabili, o polietilene) o di processi (ad es. colaggio in sabbia, o formatura per iniezione), ma all'interno di ciascuna classe vi sono notevoli variazioni. Essi sono adeguati ai confronti di massima necessari per definire le linee del progetto e, spesso, per i calcoli di massima per la realizzazione del progetto stesso. Tuttavia i dati non sono adeguati per i calcoli di dettaglio del progetto. Per questi occorre cercare di ricavare dati accurati dalle compilazioni e dalle tabelle preparate dai fornitori di materiali. I grafici aiutano a restringere la scelta tra i materiali

candidati all'interno di una breve lista ragionata, ma non a disporre di valori numerici per un'analisi accurata e conclusiva.

E' stato fatto ogni sforzo per garantire l'accuratezza dei dati riportati nei grafici. Tuttavia, non esiste la garanzia che i dati siano privi di errori, o che nuovi dati non possano sostituire quelli dati in questa sede. I grafici rappresentano un aiuto al pensare creativo, non una fonte di dati numerici per un'analisi precisa.

I materiali per l'ingegneria meccanica e strutturale rientrano in nove ampie classi elencate in seguito:

1. Leghe strutturali (metalli e loro leghe)
2. Polimeri strutturali (termoplastici e termoindurenti)
3. Ceramiche strutturali (ceramiche "avanzate")
4. Compositi strutturali (GFRP, KFRP, CFRP)
5. Ceramiche porose (mattoni, cementi, calcestruzzo, pietre)
6. Vetri (vetri silicatici)
7. Legni (assi strutturali comuni)
8. Elastomeri (gomme naturali e artificiali)
9. Schiume (polimeri-schiuma)

Nell'ambito di ciascuna classe i grafici per la scelta dei materiali mostrano i dati per un insieme rappresentativo di materiali, scelti sia per coprire l'intero campo di comportamento tipico di quella classe che per includere i componenti della classe più ampiamente usati. In questo modo l'involuppo per ciascuna classe (linee spesse) comprende dati relativi non solo ai materiali menzionati ma anche per tutti gli altri componenti della classe.

I grafici sono realizzati per le fasi di massima, preliminari della scelta dei materiali, non per ricavarne valori precisi delle proprietà quali sono necessari nelle fasi successive di progettazione dettagliata e riportano, per le nove classi di materiali, le proprietà elencate nella tabella seguente:

Proprietà	Simbolo	Unità
Densità	ρ	Kg/m ³
Costo relativo	C_R	-
Modulo di Young	E	GPa
Resistenza	σ_f	MPa
Conducibilità termica	λ	W/mK
Tasso specifico di usura	W/AP	1/MPa
Coefficiente di espansione termica	α	1/K

I grafici permettono di estrarre il sottoinsieme di materiali con una proprietà compresa in un determinato intervallo: ad esempio, materiali con un modulo elastico E compreso tra 100 e 200GPa; oppure materiali con una conducibilità termica superiore a 100 W/mK.

Più frequentemente, la prestazione viene massimizzata scegliendo il sottoinsieme di materiali con il valore più alto di un gruppo di proprietà. Una trave leggera, rigida è meglio realizzata con un materiale caratterizzato da un valore elevato di $E^{1/2}/\rho$; recipienti in pressione sicuri sono meglio realizzati con materiali caratterizzati da un valore elevato di $KI_C^{1/2}/\sigma_f$, e così via.

I grafici sono realizzati per metterli in evidenza, e per permettere di scegliere il sottoinsieme di materiali per cui l'indice è massimo. In sostanza, il criterio è di estrarre dai grafici un sottoinsieme di materiali e non un singolo materiale. Trovare il materiale migliore per una determinata applicazione richiede molte considerazioni, molte delle quali (come la disponibilità, l'aspetto e le sensazioni al tatto) non facili da quantificare. I grafici non portano alla scelta finale, che richiede l'uso di giudizio ed esperienza personali. La loro efficacia consiste nel fatto che guidano in modo rapido ed efficiente ad estrarre un sottoinsieme di materiali da considerare valido, e sicuramente non portano a trascurare un materiale candidato promettente.

1. Nel primo grafico: la resistenza, σ_f , vs. il costo relativo per unità di volume, $C_R \rho$.

Il grafico guida nella scelta di materiali per componenti resistenti ed economici (considerando il solo costo del materiale). Il costo relativo C_R viene determinato assumendo come unitario quello dell'acciaio dolce per tondini da cemento armato: $C_R = (\text{costo per unità di peso del materiale}) / (\text{costo per unità di peso dell'acciaio dolce})$.

Le linee guida mostrano i luoghi di punti per i quali è:

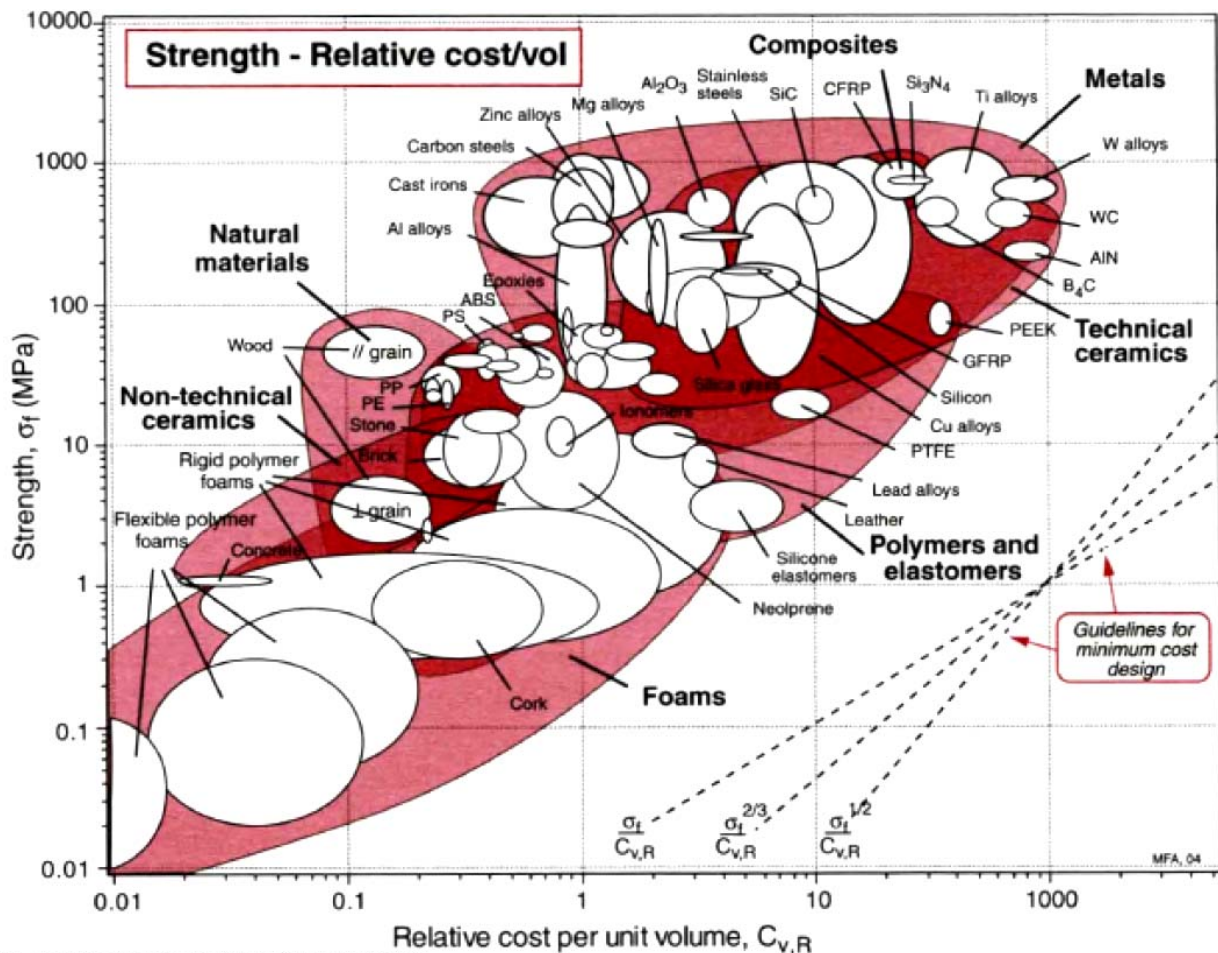
(a) $\sigma_f / C_R \rho = C$ (tiranti resistenti, dischi rotanti, costo minimo);

(b) $\sigma_f^{2/3} / C_R \rho = C$ (travi e alberi resistenti, costo minimo);

(c) $\sigma_f^{1/2} / C_R \rho = C$ (piastre resistenti, costo minimo).

Il valore della costante C aumenta per linee spostate in alto e a sinistra. I materiali con il più alto rapporto tra resistenza e costo si trovano verso l'angolo superiore sinistro.

Nel nostro particolare caso non è necessario l'utilizzo delle linee guida già presenti che includono anche la resistenza σ_f del materiale poiché non abbiamo particolari vincoli in questo senso; i materiali con un costo relativamente basso si trovano alla sinistra del nostro grafico e, escludendo i ceramici porosi, il legno e le schiume considerati inadatti in precedenza, troviamo i materiali polimerici, il che andrà a rafforzare la loro posizione nella scelta finale.



Ashby - Materials Selection in Mechanical Design (2004)

Figura 3.2 Diagramma di Ashby: resistenza, σ_f , vs. costo relativo per unità di volume, $C_{v,R}$.

2. Nel secondo grafico: resistenza, σ_f , vs. densità, ρ .

Il grafico mostrato sopra sarà utilizzato in modo indiretto per valutare la resistenza all'indentazione, e cioè dare una misura della durezza, della classe dei materiali polimerici in particolare in base alla relazione dimostrata nel capitolo precedente:

$$H = 3\sigma_y,$$

dove H rappresenta la durezza del materiale considerato e σ_y il suo carico di snervamento.

È stato considerato che per i metalli la resistenza è il carico di snervamento allo 0.2%; per i polimeri, è il carico in corrispondenza al quale la curva sforzo-deformazione cessa chiaramente di essere lineare - ciò avviene tipicamente per una deformazione dell'1%; per i ceramici e i vetri, la resistenza è quella allo schiacciamento per compressione; è da ricordare come questa sia grossomodo 15 volte maggiore della resistenza alla frattura per trazione; per i compositi la resistenza è quella a trazione; per gli elastomeri è la resistenza alla lacerazione.

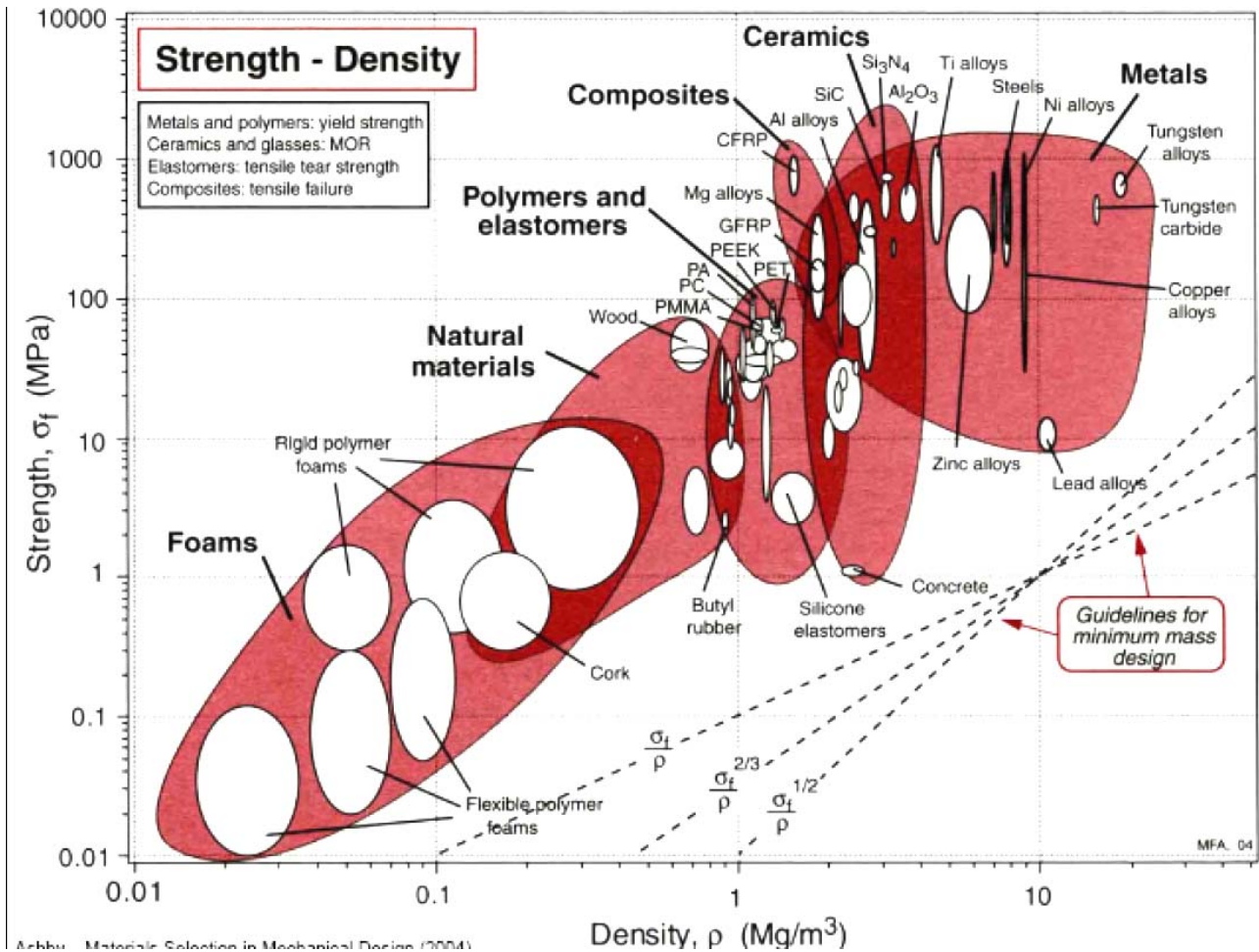


Figura 3.3 Diagramma di Ashby: resistenza, σ_f , vs. densità, ρ .

Il grafico guida nella scelta di materiali per componenti leggeri e resistenti. Le linee guida sono i luoghi di punti per i quali è:

(a) $\sigma_f / \rho = C$ (tiranti resistenti, peso minimo; piastre resistenti a velocità massime di rotazione);

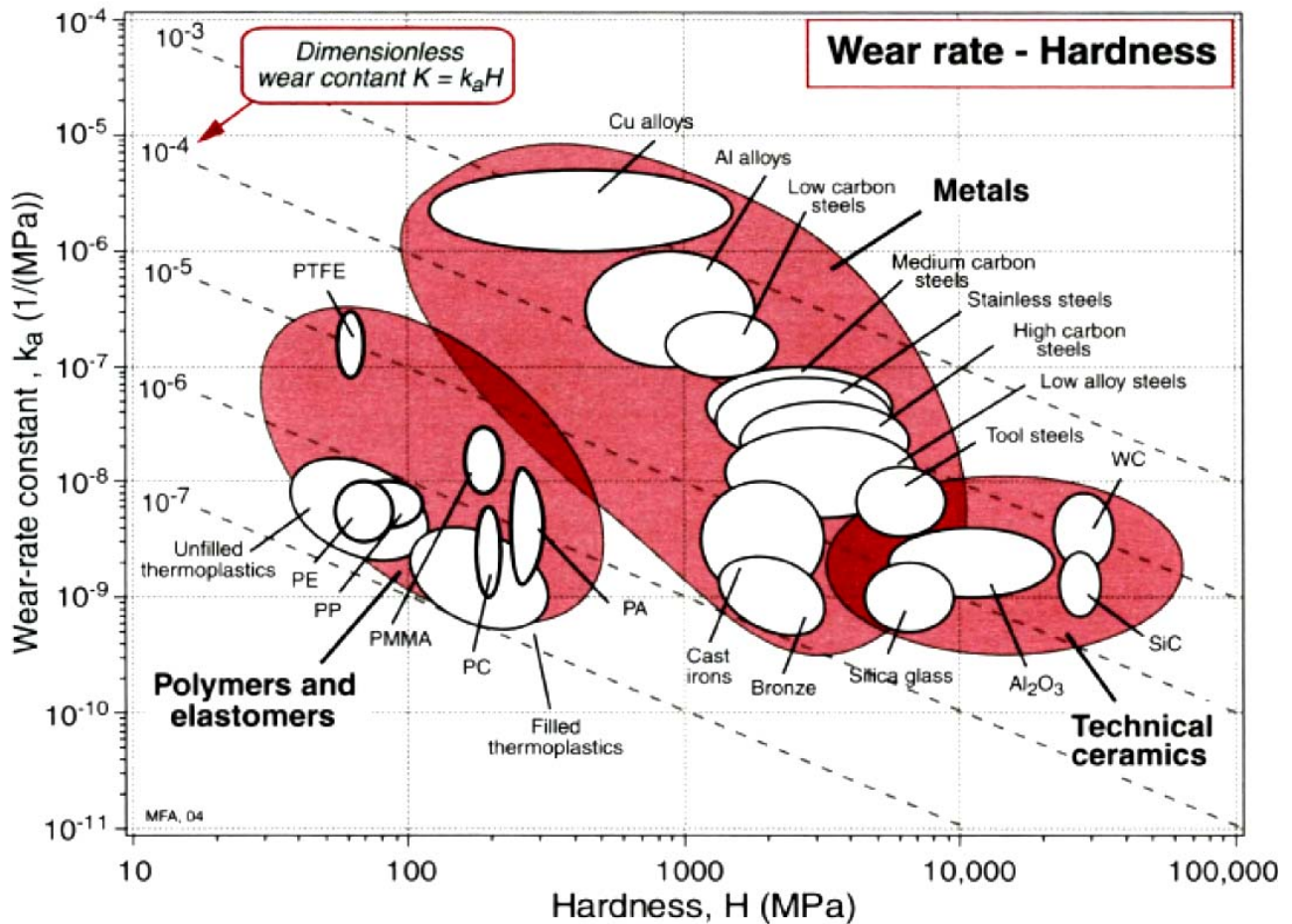
(b) $\sigma_f^{2/3} / \rho = C$ (travi e alberi resistenti, peso minimo);

(c) $\sigma_f^{1/2} / \rho = C$ (piastre resistenti, peso minimo).

Il valore della costante C aumenta per linee spostate in alto e a sinistra. Materiali che presentano il più alto rapporto tra resistenza e peso si trovano verso l'angolo in alto a sinistra.

Analizzando il grafico si osserva che hanno una resistenza all'indentazione più bassa dei metalli e dei materiali compositi, ma che possiamo considerare soddisfacente per il nostro componente in quanto nella parte alta il valori sono simili a materiali come il legno e ceramiche porose.

3. Il terzo grafico: tasso di usura a secco, k_a , vs. pressione massima di contatto, H .



Ashby - Materials Selection in Mechanical Design (2004)

Figura 3.4 Diagramma di Ashby: tasso di usura a secco, k_a , vs. pressione massima di contatto, H .

Il tasso di usura W è definito come segue:

$$W = (\text{volume di materiale rimosso dalla superficie di contatto}) / (\text{percorso di strisciamento})$$

La legge di Archard, che esprime in linea di massima i tassi di usura per velocità del moto relativo inferiori a 1 m/s, stabilisce che:

$$W = k_a A_n P$$

dove A_n rappresenta l'area nominale di contatto, P la pressione (forza per unità di area) sulle superfici striscianti, k_a la costante di Archard relativa al tasso di usura. Per valori bassi della pressione, $k_a A_n P$ è effettivamente costante, ma al crescere della pressione verso il valore massimo essa cresce rapidamente. Il grafico riporta la costante di Archard, $k_a = W / (A_n P)$, in funzione della durezza H del materiale. In ciascuna classe di materiali, a valori elevati di durezza corrispondono valori bassi di k_a . Ad una pressione data P , materiali caratterizzati da bassi valori di k_a presentano bassi valori del tasso di usura. Cuscinetti efficienti, in termini di dimensioni o peso, saranno caricati

con una frazione di sicurezza della pressione massima di esercizio, che è proporzionale alla durezza. Allo scopo, risultano migliori i materiali che presentano valori bassi del prodotto $k_a H$. Le linee in diagonale sono relative a valori costanti di $k_a H$.

Dal grafico presentato sopra si osserva che il PTFE abbia una costante di Archard, k_a , relativa al tasso di usura, simile all'acciaio e più bassa delle leghe di alluminio e rame.

4. In fine, il quarto grafico: coefficiente lineare di espansione termica, α , vs. conducibilità termica, λ .

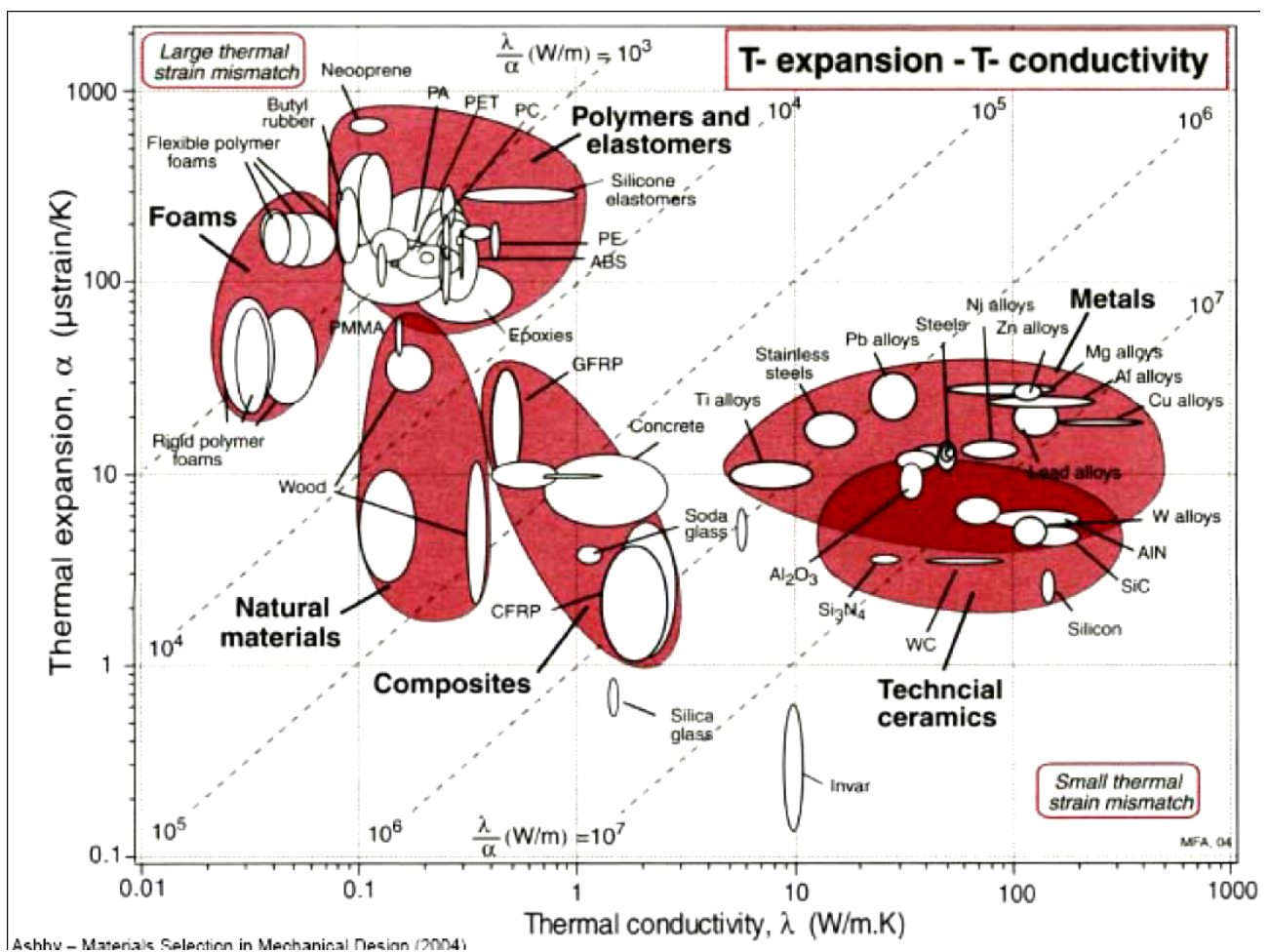


Figura 3.5 Diagramma di Ashby: coefficiente lineare di espansione termica, α , vs. conducibilità termica, λ .

Dal grafico presente interessa solo il coefficiente di espansione termica, quindi si tratta anche in questo caso di una scelta semplice, mentre la conducibilità termica andrà completamente ignorata, per cui la linea guida sarà una parallela all'ascisse.

Da questo diagramma si osserva che la classe dei materiali polimerici, sulla quale è stata indirizzata la nostra scelta presenta, insieme alla classe delle schiume, i valori più elevati per il coefficiente di espansione termica. Questa nota sfavorevole può essere facilmente superata con

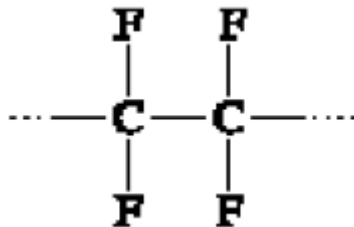
un'attenta progettazione del rivestimento, tenendo conto nelle dimensioni finali, appunto, dei vincoli geometrici della tramoggia e dell'escursione termica annua.

In seguito all'analisi svolta finora e alla disponibilità dell'azienda è stato scelto un gruppo di sei materiali, tutti appartenenti alla classe dei materiali polimerici non-rinforzati, sui quali svolgere indagini più approfondite e, alla fine, decidere quale di loro abbia le caratteristiche tecniche più vicine al materiale ideale necessario per il rivestimento. Questi sono: PTFE (politetrafluoroetilene), PP (polipropilene), PVC (polivinilcloruro), PMMA (polimetilmetacrilato), HDPE (polietilene ad alta densità) e UHMWPE (polietilene ad altissimo peso molecolare).

3.3 Breve presentazione delle caratteristiche meccaniche e termiche di materiali scelti

3.3.1. Politetrafluoroetilene (PTFE, nome commerciale teflon) è il materiale fluorurato più importante in circolazione, però, a causa della sua elevata viscosità (mostra un punto di fusione maggiore di 327°C) non può essere lavorato con i comuni processi per i materiali termoplastici. È un polimero di costo relativamente elevato, che si ottiene per polimerizzazione del tetrafluoroetilene $CF_2 = CF_2$. Viene spesso utilizzato come additivo in miscele polimeriche per ridurre l'attrito radente. È poco rigido e solido.

La sua struttura è:



Le caratteristiche specifiche sono presentate nella seguente tabella:

Proprietà	Simbolo	Valore
Densità	ρ	2,14 – 2,18kg/m ³
Resistenza a trazione	σ_f	24,5MPa
Allungamento a rottura	ϵ_r	250 - 400%
Resistenza agli urti	σ_u	-
Durezza SHORE	H	D55
Coefficiente di frizione con se stesso	μ	0,10 – 0,25
Coefficiente di espansione termica	α	1,2x10 ⁻⁴ 1/K
Assorbimento H ₂ O		1%
Costo	C	39,00€/kg

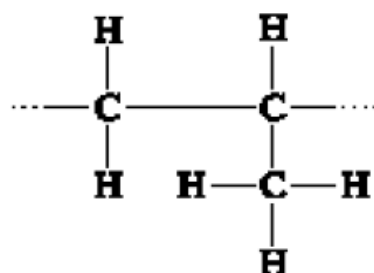
I suoi vantaggi consistono:

- nella vastità del campo di temperature d'impiego (da $- 270^{\circ}\text{C}$ a $+ 300^{\circ}\text{C}$, l'ingrafimento si ha a temperature minori di $- 260^{\circ}\text{C}$ e sopporta senza subire alterazioni i 250°C);
- nella stabilità chimica universale, anche a contatto di sostanze fortemente corrosive (molti polimeri possiedono, anche se in grado inferiore al PTFE, una notevole resistenza all'attacco sia di acidi che di alcali diluiti concentrati; a differenza dei metalli i polimeri non possiedono elettroni liberi di conduzione, perciò non possono avere una corrosione di tipo elettrochimico);
- nell'insolubilità nei tutti i solventi noti a temperature inferiori a 300°C ;
- nella resistenza agli agenti atmosferici senza l'impiego di aditivi stabilizzatori;
- nelle proprietà antincendio;
- nelle eccellenti caratteristiche elettriche e dielettriche;
- nell'ottimo comportamento antiaderente nel confronto di tutti i materiali (tra le applicazioni più tipiche troviamo i tegami da cucina con il fondo antiaderente e gli sci).

3.3.2 Il polipropilene (PP) è un polimero ottenuto dal propilene gas mediante polimerizzazione utilizzando catalizzatori stereospecifici che sono in grado di legare molte molecole dando luogo a lunghe catene a forma di elica. È un termoplastico che può mostrare diversa tatticità. Il prodotto più interessante dal punto di vista commerciale è quello isotattico (i gruppi metilici sono distribuiti con regolarità lungo la catena di atomi di carbonio): è un polimero semicristallino caratterizzato da un elevato carico di rottura, una bassa densità, una buona resistenza termica ed all'abrasione.

È un polimero vinilico simile al polietilene ma molto più versatile e con caratteristiche termiche e meccaniche migliori (fonde ad oltre 170°C , ha un carico di rottura di 50MPa), uguale inerzia chimica, resistenza ai solventi, proprietà dielettriche.

La sua struttura è:



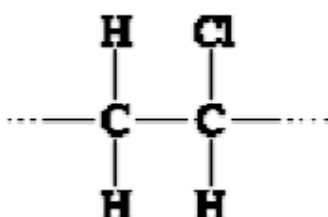
Le caratteristiche specifiche sono presentate nella seguente tabella:

Proprietà	Simbolo	Valore
Densità	ρ	0,90 – 0,93kg/m ³
Resistenza a trazione	σ_f	50MPa
Allungamento a rottura	ε_r	500 - 600%
Resistenza agli urti	σ_u	50J/m
Durezza SHORE	H	D70
Coefficiente di frizione con se stesso	μ	0,35 – 0,45
Coefficiente di espansione termica	α	1,6x10 ⁻⁴ 1/K
Assorbimento H ₂ O		1%
Costo	C	1,05 – 1,33€/kg

3.3.3 Polivinilcloruro (PVC) è un polimero termoplastico ricavato da materie prime naturali quali il sale ed il petrolio ed è una delle materie plastiche più versatili, più economiche e più diffuse che presenta caratteristiche di grande durata. È il polimero del cloruro di vinile – il più importante della serie ottenuta da monomeri vinilici. È un materiale duro con buoni valori di resistenza meccanica, elevata inerzia chimica anche in presenza di ossidanti come l'acido nitrico e parzialmente solubile in acetone e alcuni composti aromatici. Ha ottime proprietà dielettriche che ne fanno un buon isolante. La resistenza termica, invece, è limitata: solo 60°C in esercizio continuo. Può essere incollato con colle contenenti solventi ed ha uno scarso assorbimento di umidità che gli conferisce una buona stabilità dimensionale.

Questo materiale è resistente al fuoco grazie alla componente di cloruro, la quale, in caso di incendio viene rilasciata e inibisce la combustione. Tuttavia viene considerato stabile e sicuro solamente nelle applicazioni tecnologiche svolte a temperatura ambiente, ma estremamente pericoloso se bruciato o scaldato ad elevata temperatura in impianti inadeguati per via della presenza dello stesso cloro nella sua molecola che può liberarsi come acido cloridrico, come diossine o come cloruro di vinile monomero.

La reazione di polimerizzazione del PVC porta alla formazione di lunghe catene lineari con una struttura del tipo:



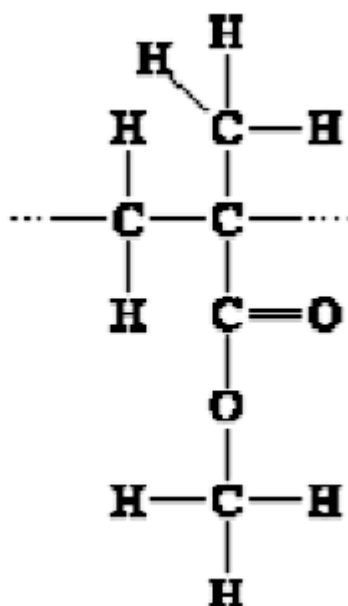
Le caratteristiche specifiche sono presentate nella seguente tabella:

Proprietà	Simbolo	Valore
Densità	ρ	1,45kg/m ³
Resistenza a trazione	σ_f	50MPa
Allungamento a rottura	ε_r	5 - 40%
Resistenza agli urti	σ_u	100J/m
Durezza SHORE D	H	82
Coefficiente di frizione con se stesso	μ	0,55 – 0,60
Coefficiente di espansione termica	α	0,8x10 ⁻⁴ 1/K
Assorbimento H ₂ O		20%
Costo	C	0,91 – 1,18€/kg

3.3.4 Il polimetilmetacrilato (PMMA, nome commerciale Plexiglas) è un vetro organico, però assai meno fragile del vetro comune ed ha buona resistenza meccanica, ottima trasparenza e buona resistenza alla luce e agli agenti atmosferici. La sua trasparenza deriva dall'elevata purezza del materiale e dal suo stato completamente amorfo. Si è riscontrato, infatti, che la presenza di cristalli lamellari o sferulitici ne diminuisce immediatamente la trasparenza in quanto tali cristalli provocano una forte dispersione della luce incidente.

Generalmente viene utilizzato per lenti, per ampie vetrate, tettucci degli aerei.

Chimicamente è il polimero del metacrilato di metile, estere dell'acido metacrilico e presenta una struttura del tipo:



Le caratteristiche specifiche sono presentate nella seguente tabella:

Proprietà	Simbolo	Valore
Densità	ρ	1,18kg/m ³
Resistenza a trazione	σ_f	67 - 75MPa
Allungamento a rottura	ε_r	4 - 6%
Resistenza agli urti	σ_u	20J/m
Durezza SHORE	H	D 86
Coefficiente di frizione con se stesso	μ	0,10 – 0,25
Coefficiente di espansione termica	α	0,7x10 ⁻⁴ 1/K
Assorbimento H ₂ O		30%
Costo	C	2,55 – 2,85€/kg

3.3.5 Il polietilene (PE) è il più semplice dei polimeri sintetici ed il più comune tra le materie plastiche: delle catene di lunghezza variabile più o meno ramificate. È un termoplastico e si presenta come un solido trasparente (forma amorfa) o bianco (forma cristallina) con ottime proprietà isolanti e di stabilità chimica; è un materiale molto versatile e nello stesso tempo una delle materie plastiche più economiche.

Il PE ottenuto con il processo radicalico ha le catene molto ramificate (da 20 a 50 ramificazioni ogni 1000 atomi). I polimeri ramificati presentano punto di rammollimento basso e maggiore difficoltà di cristallizzazione rispetto ai corrispondenti polimeri lineari, in quanto, evidentemente le catene laterali impediscono una buona compattazione delle macromolecole, i cui legami reciproci saranno di conseguenza più deboli. Il PE ottenuto ha un basso grado di cristallinità, una bassa densità (0,91 - 0,93kg/m³), un basso punto di fusione (110°C), una scarsa resistenza meccanica ($\sigma_f < 20\text{MPa}$) e viene denominato LDPE (low density polyethylene).

Al contrario, il PE sintetizzato a bassa temperatura attraverso polimerizzazione per coordinazione con un sistema catalitico di tipo Ziegler-Natta ha poche e corte ramificazioni, alta cristallinità (95%), e maggiore densità (0,96kg/m³), punto di fusione (130°C) e resistenza meccanica (fino a 40MPa). Viene denominato HDPE (high density polyethylene) ed ha, quindi, forze intermolecolari più elevate e maggiore rigidità rispetto al polietilene ramificato a bassa densità.

Presenta una buona inerzia chimica, quindi è molto usato per rivestimenti di vasche e serbatoi, tubi e recipienti, che possono venire anche saldati.

Le caratteristiche specifiche sono presentate nella seguente tabella:

Proprietà	Simbolo	Valore
Densità	ρ	0.96kg/m ³
Resistenza a trazione	σ_f	40MPa
Allungamento a rottura	ε_r	450%
Resistenza agli urti	σ_u	150J/m
Durezza SHORE D	H	18
Coefficiente di frizione con se stesso	μ	0,30
Coefficiente di espansione termica	α	1,8x10 ⁻⁴ 1/K
Assorbimento H ₂ O		1%
Costo	C	0,91 -1,05€/kg

Un tipo molto recente di polietilene, caratterizzato da un peso molecolare estremamente elevato (da 2x10⁶ a 6x10⁶g/mol), può essere ottenuto soltanto tramite l'impiego di catalizzatori stereospecifici detti metalloceni – complessi organo-metallici con una particolare struttura molecolare. Tale polietilene, denominato UHMWPE (ultra high molecular weight polyethylen), conosciuto anche come polietilene ad alto modulo (HMPE – high modulus polyethylene) o polietilene ad alte prestazioni (HPPE – high performance polyethylene) è una sottoclasse del polietilene termoplastico. La sua catena lunghissima serve a trasferire in maniera più efficace i carichi applicati a causa delle interazioni intermolecolari più forti. Questo si traduce in un materiale molto duro con la più alta resistenza all'impatto di qualsiasi materiale termoplastico realizzato finora. È altamente resistente alla corrosione delle sostanze chimiche eccezione facendo solo gli acidi ossidanti; ha un coefficiente di assorbimento di umidità molto basso ed un bassissimo coefficiente d'attrito. È autolubrificante, e altamente resistente all'abrasione (in alcune forme 15 volte più resistente all'abrasione rispetto al carbonio). Il suo coefficiente d'attrito è inferiore di nylon o acetale, paragonabile a quello di PTFE, ma con una resistenza all'abrasione migliore del teflon.

UHMWPE è un tipo di poliolefina. È costituito da catene estremamente lunghe di PE allineate tutte nella stessa direzione. I legami van der Waals tra gli atomi delle molecole adiacenti sono relativamente deboli, però, avendo delle molecole estremamente lunghe, possono essere contatti su una lunghezza considerevole sommando così la capacità di trasmettere la sollecitazione da una molecola ad altra. La grande probabilità di sovrapposizione tra le catene adiacenti fa sì che la

forza di legame complessiva tra di loro sia molto elevata nonostante la debolezza delle forze di attrazione di van der Waals.

La semplicità della struttura della molecola determina proprietà superficiali e chimiche che sono rare nei polimeri ad alte prestazioni. Per esempio, i gruppi polari presenti nella maggior parte dei polimeri facilitano l'assorbimento dell'acqua ed in modo simile i polimeri contenenti gruppi aromatici sono suscettibili all'azione dei solventi aromatici: poiché l' UHMWPE non contiene gruppi simili presenta un basso coefficiente di assorbimento dell'acqua ed è praticamente insolubile in solventi apolari.

L'assenza totale di qualsiasi tipo di gruppo funzionale chimico (estereo, ammidico o ossidrilico) lo rende molto resistente all'attacco degli agenti chimici aggressivi, dell'acqua, dell'umidità, radiazioni UV e microrganismi.

Inoltre, trova applicazioni per la sua capacità di smorzamento acustico e per eccellenti caratteristiche dielettriche e resistive.

Le caratteristiche specifiche sono presentate nella seguente tabella:

Proprietà	Simbolo	Valore
Densità	ρ	0,93kg/m ³
Resistenza a trazione	σ_f	> 17MPa
Allungamento a rottura	ϵ_r	250%
Resistenza agli urti	σ_u	180J/m
Durezza SHORE D	H	60 - 65
Coefficiente di frizione con se stesso	μ	0,15
Coefficiente di espansione termica	α	2×10^{-4} 1/K
Assorbimento H ₂ O		1%
Costo	C	5,00€/kg

3.4 Determinazione sperimentale del coefficiente di frizione. Valutazione qualitativa della resistenza all'abrasione

Le tabelle presentate in precedenza contengono valori ottenuti mediante prove effettuate in laboratorio in condizioni standard, però si osserva la mancanza di dati necessari per poter proseguire il percorso cominciato per la selezione del materiale di rivestimento: il coefficiente di frizione reale tra la superficie del rivestimento ed il materiale che passa attraverso la tramoggia, ed tasso di usura dello stesso. La misura del coefficiente di frizione, generalmente, è molto sensibile alle condizioni

Per questo motivo è stato deciso di determinare questi due valori in maniera sperimentale. Per fare queste misure è stato utilizzato il dispositivo presentato anteriormente, nella prima fase, quando sono stati eliminati i materiali inidonei.

L'angolo del piano inclinato è stato regolato a 30°, sono state utilizzate lastre di 10mm di spessore, fabbricate in corrispettivi materiali, sulle quali è stato lasciato scorrere lo stesso provino della prima sperimentazione (il mattone da 15kg di forma quasi cubica). Assumendo che il provino inizialmente si trova a riposo (velocità iniziale $v_0 = 0$) per avere il coefficiente di frizione è sufficiente misurare il tempo in cui il provino percorre una distanza prefissata sul piano inclinato che nel nostro caso era di 2m.

Per la misura della resistenza all'abrasione sarebbe stato necessario misurare il peso della lastra prima e dopo lo scorrimento del provino con estrema precisione. Non disponendo di una bilancia adeguata è stato deciso di dare solo una valutazione qualitativa con corrispondenti indici (buona = 3; media = 2 e scarsa = 1) analizzando ad occhio nudo la superficie delle lastra dopo venti lanci consecutivi del provino.

I risultati ottenuti sono presentati nelle seguente tabella:

materiale	Tempo [s]	Coefficiente di frizione calcolato [-]	Resistenza all'abrasione [indice qualitativo]
PTFE	3,22	0,13	3
PP	4,72	0,37	1
PVC	7,27	0,49	2
PMMA	13,00	0,55	2
HDPE	4,95	0,39	1
UHMWPE	3,32	0,16	3

Capitolo 4

Selezione multipla con obiettivi concorrenti

Nell'affrontare un problema di ottimizzazione possono essere utilizzati vari approcci a seconda sia della difficoltà specifica e delle dimensioni del problema in esame, sia degli obiettivi reali che si vogliono ottenere.

4.1 Analytical Hierarchy Process (AHP)

AHP rappresenta un metodo sistematico per confrontare un elenco di obiettivi o alternative e, quando viene utilizzato nei sistemi dell'ingegneria di processo, può essere uno strumento potente per confrontare progetti concettualmente alternativi.

AHP è una tecnica di supporto alle decisioni multicriterio; la metodologia consente di confrontare più alternative in relazione ad una pluralità di criteri, di tipo quantitativo o qualitativo, e ricavare una soluzione globale per ciascuna di esse. Ciò permette di:

- ordinare le alternative secondo un'asse di preferenza;
- selezionare l'alternativa globalmente minore;
- assegnare le alternative a sottoinsiemi predefiniti.

I principali punti di forza di questo metodo sono dati dalla possibilità di confronto a coppie delle alternative decisionali e la separazione fra l'importanza del criterio e l'impatto sulla decisione. L'AHP prevede una distinzione fra la componente soggettiva della valutazione e il dato oggettivo. Il decisore individua un'insieme di criteri di valutazione delle "n" alternative decisionali ed assegna ad ogni criterio un "peso" percentuale, dopodiché assegna un punteggio che è l'impatto del criterio sulla decisione. Il punteggio di ogni alternativa decisionale è la media pesata dei punteggi di ogni criterio sulla decisione per il peso assegnato ad ogni criterio.

La soluzione globale di ogni alternativa viene raggiunta attraverso il calcolo del valore della funzione di penalizzazione nel caso in cui gli obiettivi devono essere minimizzati, oppure della funzione di prestazione nel caso in cui gli obiettivi devono essere massimizzati:

$$z = \sum m_i P_i,$$

dove P_i sono le proprietà considerate e m_i i corrispondenti pesi percentuali.

Per poter proseguire con l'algoritmo è necessario ricapitolare tutti gli obiettivi, in ordine decrescente della loro importanza, assegnando a ciascuno di loro un indice di merito, insieme a tutti gli altri dati raccolti provenienti dalla letteratura oppure dalla propria sperimentazione. Tutto viene presentato nella tabella seguente:

Nr. crt.	Coefficiente di frizione μ [-]	Costo C [€/kg]	Durezza H [shore d]	Resistenza all'abrasione σ_u [ind. qual.]	Coefficiente di espansione termica α [K ⁻¹]	Materiale
1.	0,13	39,0	55	3	$1,2 \times 10^{-4}$	PTFE
2.	0,37	1,33	70	1	$1,6 \times 10^{-4}$	PP
3.	0,49	1,18	82	2	$0,8 \times 10^{-4}$	PVC
4.	0,55	2,85	86	2	$0,7 \times 10^{-4}$	PMMA
5.	0,39	1,05	18	1	$1,8 \times 10^{-4}$	HDPE
6.	0,16	5,00	65	3	$2,0 \times 10^{-4}$	UHMWPE
Ind. merito	10	6	3	2	1	

Si nota subito che le grandezze considerate non hanno tutte la stessa tendenza, e cioè per ottimizzare la selezione il coefficiente di frizione, il costo ed il coefficiente di espansione termica devono essere minimizzati, mentre la durezza e la resistenza all'abrasione vanno massimizzate. Ovviamente, per avere la stessa tendenza saranno considerati gli inversi della durezza e della resistenza all'abrasione, per cui il prossimo step consiste nel riscrivere la tabella anteriore considerando tali grandezze inverse.

Nr. crt.	Coefficiente di frizione μ [-]	Costo C [€/kg]	Durezza ⁻¹ H ⁻¹ [shore d] ⁻¹	Resistenza all'abrasione σ_u^{-1} [ind. qual.] ⁻¹	Coefficiente di espansione termica α [K ⁻¹]	Materiale
1.	0,13	39,0	$18,10 \times 10^{-3}$	0,33	$1,2 \times 10^{-4}$	PTFE
2.	0,37	1,33	$14,28 \times 10^{-3}$	1	$1,6 \times 10^{-4}$	PP
3.	0,49	1,18	$12,20 \times 10^{-3}$	0,5	$0,8 \times 10^{-4}$	PVC
4.	0,55	2,85	$11,63 \times 10^{-3}$	0,5	$0,7 \times 10^{-4}$	PMMA
5.	0,39	1,05	$55,60 \times 10^{-3}$	1	$1,8 \times 10^{-4}$	HDPE
6.	0,16	5,00	$15,38 \times 10^{-3}$	0,33	$2,0 \times 10^{-4}$	UHMWPE
Ind. merito	10	6	3	2	1	

Da come si può facilmente osservare le grandezze considerate non sono omologhe e per poter calcolare il valore della funzione di penalizzazione/prestazione prima è necessario normalizzare tali grandezze. Se le i valori delle grandezze devono essere più alti possibili la normalizzazione si fa rispetto al valore più alto esistente (è il caso della funzione di prestazione), mentre se i valori delle grandezze devono essere più bassi possibili la normalizzazione si farà rispetto al valore più basso esistente (ed è il caso della funzione di penalizzazione). In questo modo tutte le grandezze vengono trasformate in numeri puri, che sono omologhi, e quindi si possono sommare e confrontare ulteriormente.

Tante volte si tratta solamente di sostituire un materiale in esercizio con un altro con delle prestazioni migliori; in questo caso è consuetudine fare la normalizzazione dei valori delle grandezze considerate rispetto ai valori del materiale già in uso. Pertanto è inappropriato considerare come materiale di riferimento l'acciaio con il quale sono state costruite le pareti della tramoggia per il semplice motivo che la macchina non ha mai funzionato e, dunque, non si tratta di un materiale in esercizio.

Nel nostro specifico caso la soluzione globale verrà data attraverso la funzione di penalizzazione in quanto gli obiettivi considerati devono essere minimizzati per cui la normalizzazione è stata fatta rispetto al valore più basso riscontrato da come segue:

Nr. crt.	Coefficiente di frizione μ [-]	Costo C [€/kg]	Durezza ⁻¹ H ¹ [shore d] ⁻¹	Resistenza all'abrasione σ_u ⁻¹ [ind. qual.] ⁻¹	Coefficiente di espansione termica α [K ⁻¹]	Materiale
1.	1,00	37,14	1,56	1	1,714	PTFE
2.	2,85	1,21	1,23	3	2,286	PP
3.	3,77	1,12	1,05	2	1,143	PVC
4.	4,23	2,71	1,00	2	1,000	PMMA
5.	3,00	1,00	4,78	3	2,571	HDPE
6.	1,23	4,76	1,32	1	2,857	UHMWPE

In seguito alla normalizzazione delle grandezze si procede con la media pesata e si trova il valore della funzione di penalizzazione (di prestazione); verrà scelto, quindi, il materiale corrispondente al più basso valore della funzione di penalizzazione, oppure al valore più alto della funzione di prestazione.

Il prossimo step consiste nel determinare i corrispondenti pesi delle grandezze considerate in base agli indici di merito assegnati in partenza. Per questo si costruisce una matrice quadratica partendo dall'alto con l'indice minore e andando in basso verso l'indice maggiore:

	α	σ_u	H	C	μ
α	1	1/2	1/3	1/6	1/10
σ_u	2	1	1/2	1/5	1/9
H	3	2	1	1/4	1/7
C	6	5	4	1	1/4
μ	10	9	7	4	1
somma	22	17,5	12,83	5,617	1,604

Tutti gli elementi di una colonna vengono divisi alla somma della colonna corrispondente:

	α	σ_u	H	C	μ	Media aritmetica della linea
α	0,045	0,028	0,026	0,030	0,062	0,0382
σ_u	0,091	0,057	0,039	0,036	0,069	0,0584
H	0,136	0,114	0,078	0,044	0,089	0,0922
C	0,272	0,286	0,312	0,178	0,156	0,2406
μ	0,454	0,514	0,546	0,712	0,623	0,5698

Somma 0,9992

L'ultimo step è il calcolo del valore delle funzione di penalizzazione per ogni alternativa:

Nr. crt.	μ	C	H^{-1}	σ_u^{-1}	α	Materiale	Funzione $z = \sum m_i P_i$
1.	1,00	37,14	1,56	1	1,714	PTFE	9,773
2.	2,85	1,21	1,23	3	2,286	PP	2,291
3.	3,77	1,12	1,05	2	1,143	PVC	2,674
4.	4,23	2,71	1,00	2	1,000	PMMA	3,309
5.	3,00	1,00	4,78	3	2,571	HDPE	6,082
6.	1,23	4,76	1,32	1	2,857	UHMWPE	2,125
peso	0,5698	0,2406	0,0922	0,0584	0,0382		

Il valore più basso corrisponde a UHMWPE che sarà, dunque, il materiale migliore per la nostra applicazione. Si osserva che con questo metodo il PTFE, che ha il più basso coefficiente d'attrito è finito all'ultimo posto del ranking. Questo è dovuto principalmente a due motivi: il primo, di natura oggettiva, è sicuramente il prezzo molto elevato (39,00€/kg rispetto a 3€/kg in media degli altri), mentre il secondo, di natura soggettiva, è l'indice di merito attribuito al parametro costo abbastanza elevato (più alto della media).

4.2 Statistica Digital Logic ed Enhanced Digital Logic

Esistono anche altri metodi per stabilire i pesi corrispondenti ad ogni grandezza considerata: la statistica Digital Logic fa un confronto a coppie e attribuisce "1" alla grandezza più importante gerarchicamente e "0" a quella meno importante, mentre la Enhanced Digital Logic viene a correggere un mal funzionamento del primo nel caso in cui la somma dei voti positivi di una delle grandezze analizzate è nulla e attribuisce valori diversi da "0" da come segue:

Digital Logic

grandezza		Voti positivi	pesi
μ	1 1 1 1	4	0,4
C	0 1 1 1	3	0,3
H^{-1}	0 0 1 1	2	0,2
σ_u^{-1}	0 0 0 1	1	0,1
α	0 0 0 0	0	0

Enhanced Digital Logic

grandezza		Voti positivi	pesi
μ	10 10 10 10	40	0,454
C	6 6 6 6	24	0,272
H^{-1}	3 3 3 3	12	0,136
σ_u^{-1}	2 2 2 2	8	0,091
α	1 1 1 1	4	0,045

Nella prossima tabella è presentata una sintesi di tutti e tre metodi per il calcolo dei pesi delle grandezze analizzate, necessari al calcolo della funzione di penalizzazione, mostrati anteriormente. Si osserva che la AHP premia la caratteristica principale richiesta (nel nostro caso il coefficiente di frizione) al danno delle caratteristiche secondarie (necessarie ma non determinanti).

Digital Logic	Enhanced Digital Logic	Analytical Hierarchy Process
0,4	0,454	0,5698
0,3	0,272	0,2406
0,2	0,136	0,0922
0,1	0,091	0,0584
0 (?!)	0,045	0,0382

4.3 Tivar[®]88 – scelta definitiva

Il materiale scelto per il rivestimento della tramoggia è stato l'UHMWPE, il polietilene ad altissimo peso molecolare, con commercializzato sotto il nome di Tivar[®]88 con le caratteristiche fisico-chimiche e le modalità di impiego presentate nella scheda tecnica mostrata alla fine di questo capitolo.

Il montaggio del rivestimento è stato effettuato in opera utilizzando un metodo molto innovativo ed efficiente. Invece di adottare il classico metodo che prevede la foratura della lamiera in acciaio ed il fissaggio dei pannelli di UHMWPE attraverso bulloni come in figura:

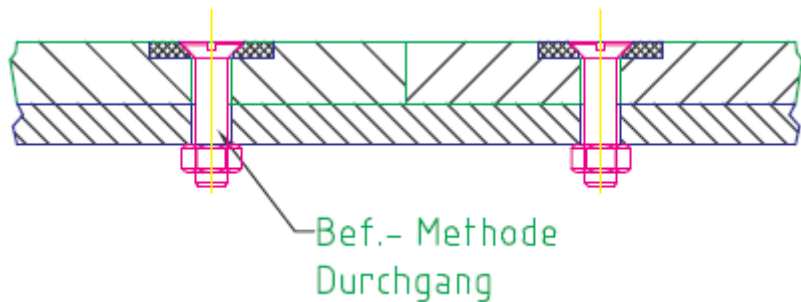


Figura 4.1 Illustrazione schematica del metodo classico.

è stato utilizzato QuickSilver[®]-Weld Washers:

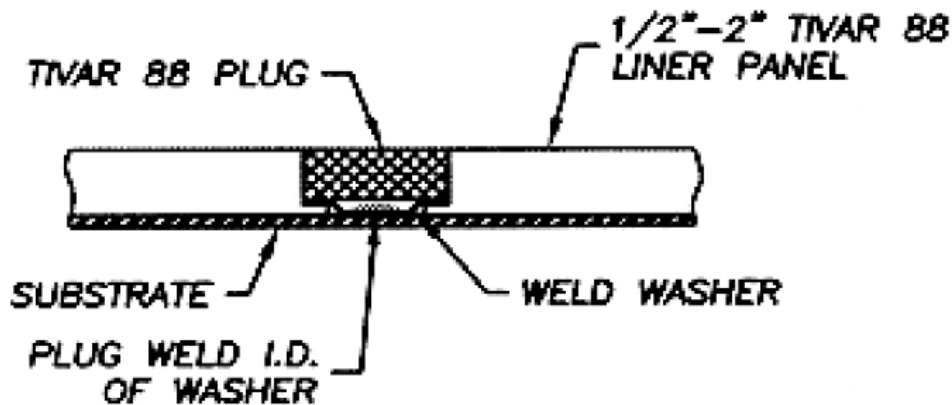


Figura 4.2 Illustrazione schematica del metodo QuickSilver[®]-Weld Washers.

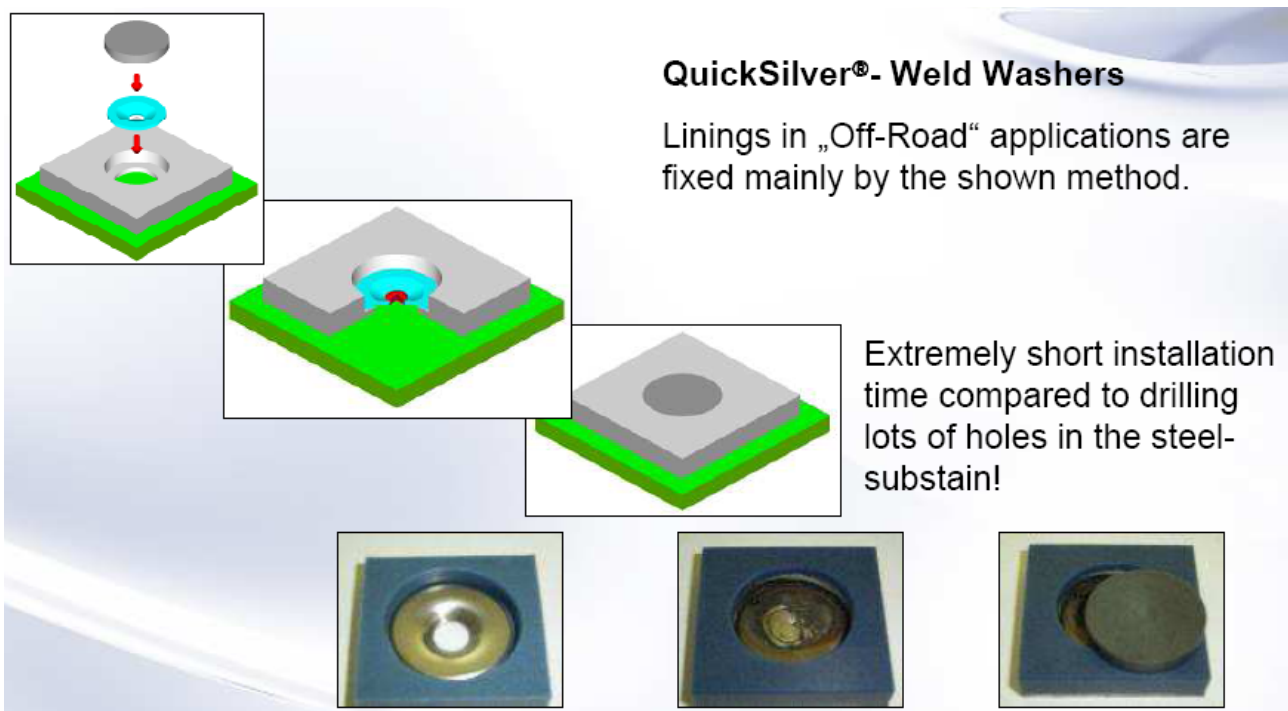


Figura 4.3 Dimostrazione della facilità di montaggio in opera con il metodo QuickSilver®-Weld Washers.



Figura 4.4 applicazione in opera del rivestimento in Tivar®88.



Figura 4.5 Immagine delle tramoggia con il rivestimento applicato.

Technical Data

TIVAR® Materials

Material designation

TIVAR® 88

Material description

premium grade
for System TIVAR®
linings

Colour(s)	blue		
Material properties			
Average molecular weight (average molecular mass)	Standard	Unit	Value
Average molecular weight (average molecular mass)		(g/mol)	approx. $9 \cdot 10^6$
Density	ISO 1183	(kg/m ³)	≥ 934
Water absorption at 23° C until saturation	ISO 62	(%)	< 0,01
Mechanical properties			
Tensile stress at yield (tensile strength)	Standard	Unit	Value
Tensile stress at yield (tensile strength)	ISO 527	(MPa)	≥ 17
Elongation at break	ISO 527	(%)	≥ 250
Tensile modulus	ISO 527	(MPa)	790
Impact strength (Charpy) at 23° C	ISO 179	(kJ/m ²)	no break
Notched impact strength (Charpy) at 23° C	ISO 11542-2	(kJ/m ²)	≥ 120
Ball indentation hardness	ISO 2039-1	(N/mm ²)	30 - 35
Shore-Hardness D, 15 s value	ISO 868	(-)	60 - 65
Coefficient of friction	-	(-)	approx. 0,15
Abrasion (Sand-Slurry)	-	(%)	80
Thermal properties			
Melting point DSC, 10 K/min	Standard	Unit	Value
Melting point DSC, 10 K/min	ISO 3146	(°C)	135 - 138
Vicat softening point	ISO 306	(°C)	80
Coefficient of linear thermal expansion between 23 and 80° C	ISO 11359	(K ⁻¹)	approx. $2 \cdot 10^{-4}$
Thermal conductivity	ISO 52612	(W/[m * K])	approx. 0,4
Use temperature (max.)	-	(°C)	80
Use temperature (briefly)	-	(°C)	90
Use temperature (min.)	-	(°C)	-200
Electrical properties			
Relative permittivity at 100 Hz	Standard	Unit	Value
Relative permittivity at 100 Hz	IEC 60250	(-)	2,1
Dissipation factor at 100 Hz	IEC 60250	(-)	approx. $3,9 \cdot 10^{-4}$
Volume resistivity	IEC 60093	(Ohm * m)	> 10^{12}
Surface resistivity	IEC 60093	(Ohm)	> 10^{12}
Dielectric strength	IEC 60243	(kV/mm)	45
Physiological properties			
Food conformance according to	Standard	Unit	Value
Food conformance according to EU Directive 2002/72/EC			no
FDA Regulation 21CFR177.1520			no
FDA Regulation 21CFR178.2010			no
FDA Regulation 21CFR178.3297			no

Notice to users:

The technical data shown in this data sheet refers to a 40 mm thick sheet. Due to the production process the data may vary depending on the material thickness.

The information contained in this technical data sheet can not be construed as a promise or guarantee of specific properties of our products. Any determination of the suitability of a particular material and part design for any use contemplated by the user is the sole responsibility of the user. The information contained in this technical data sheet is based on present knowledge and may be subject to change without further notice.

Material safety data sheet

acc. to 2001/58/EC

TIVAR® 1000 black
1.1 Trade name

TIVAR® 1000 black

1.2 Description of substance and preparation and name of the company

Product information:	Trade name TIVAR® 1000 black
Information about the manufacturer/supplier:	Quadrant PHS Deutschland GmbH Postfach 1264 48685 Vreden / Deutschland Tel.: 0 25 64 - 3 01 - 0 Fax: 0 25 64 - 3 01 - 2 55
For further information please contact:	Quality management: phone +49 (0) 25 64 - 3 01 - 1 20 Environmental management: phone +49 (0) 25 64 - 3 01 - 1 20
Emergency call:	phone +49 (0) 25 64 - 3 01 - 1 20

2. Composition / Information on ingredients

Chemical characteristics:	ultra high molecular weight polyethylene
---------------------------	--

3. Possibility of danger

not known

4. First aid measures

Skin-burns caused by dripping material must be treated by a doctor.

5. Fire protection measures

Use a self-contained breathing apparatus.

Suitable extinguishing media:	Water mist, foam or dry chemicals, carbondioxid
-------------------------------	---

6. Measures against accidental release

inapplicable

7. Handling and storage

Handling:	No special instructions to be followed.
Storage:	If protected against ultraviolet light, unlimited storage is possible.

8. Exposure controls and personal protection

If there is no extraction system, a breathing mask should be used during machining of filled material.

9. Physical and chemical properties

Appearance:	Form: firm
	Colour: various
	Odour: odourless
Change in physical state:	Cristallinity melting range 135 - 138° C
Flash point:	inapplicable
Ignition temperature:	approx. 350° C
Density:	0,92 - 0,98 g/cm³

Material safety data sheet

acc. to 2001/58/EG

TIVAR® 1000 black

10. Stability and reactivity

Thermal decomposition: above approx. 300° C
Hazardous decomposition products: None. When burning, carbon black, carbondioxid, water and lower molecular weight polyethylene will occur. If burned uncompletely, carbonmonoxid may also occur.

11. Toxicological information

After long-term application of the product no influences on health have been observed.

12. Ecological information

Biologically not degradable, insoluble in water, avoid disposal to the environment, can be separated in sewage plants mechanically.

13. Disposal consideration

Recycling or dumpsite in accordance with local regulations.

Waste key (European waste catalogue): unused product 12 01 05

14. Transport information

No dangerous good in sense of German transport regulations.

15. Regulatory information

No dangerous substance according to GefStoffV

Risk classification: none
Safety classification: none
Water pollution class: WGK 0 - no hazard to water (own ranking)
VbF: inapplicable

16. Other information

This information is based on our present state of knowledge and is intended to provide general notes on our products and their safety requirements. It should not be construed as guaranteeing specific properties of the products.

Capitolo 5

Possibilità di miglioramento delle caratteristiche del UHMWPE

5.1 Composito UHMWPE/caolino

Il polietilene ad altissimo peso molecolare ed i suoi compositi sono ampiamente utilizzati come materiali per cuscinetti, ingranaggi e guide in industria alimentare e delle attrezzature mediche a causa delle loro eccellenti caratteristiche di frizione e resistenza all'usura, dell'elevata resistenza alla corrosione e delle buone proprietà meccaniche. Con lo sviluppo del loro utilizzo come materiali autolubrificanti lo studio delle loro proprietà di attrito e di usura in condizioni di scorrimento senza lubrificanti si è ampliato notevolmente.

E noto ormai che il comportamento tribologico dei polimeri può essere migliorato in maniera significativa con riempitivi inorganici sotto forma di granuli. Le particelle di CuO, CuF₂, PbS, Ag₂S sono molto efficaci come riempitivi per il miglioramento della resistenza all'usura del polietilene ad alta densità (HDPE), del politetrafluoroetilene (PTFE), del nylon (PA), del polietereterchetone (PEEK), mentre le cariche di BaF₂, CaF₂, ZnF₂, ZnS sono dannose. Ovviamente il comportamento tribologico dei compositi UHMWPE/particelle inorganiche dipende strettamente dalle caratteristiche della matrice, dalle caratteristiche meccaniche delle particelle e dall'interfaccia e, per questo motivo, alcuni ricercatori hanno suggerito che la resistenza all'usura del composito dipende dalla durezza del materiale inorganico e dalla robustezza (debolezza) dell'interfaccia. Tuttavia questa supposizione non è stata mai convincente poiché non esiste una relazione diretta tra la durezza del riempitivo e la capacità di resistere all'usura del composito. Di solito la miglior performance di attrito dei polimeri con profilo molecolare liscio viene attribuita alla facilità con cui le lunghe catene polimeriche si stringono una attorno l'altra. E chiaro che esiste anche un rapporto molto stretto tra la natura del riempitivo, il metodo di riempimento, la struttura e il comportamento tribologico del composito.

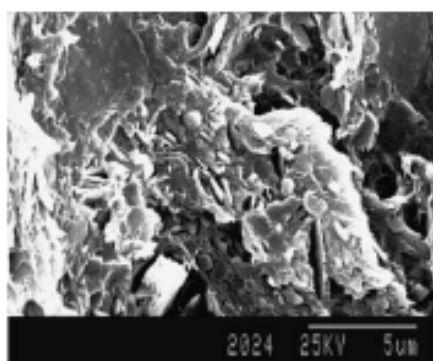
Uno studio molto interessante di Guofang G. e al. si riferisce al composito UHMWPE/caolino ottenuto in due modi diversi: nel primo il riempitivo viene inserito durante il processo di polimerizzazione del UHMWPE, mentre nel secondo il caolino viene introdotto per miscelazione diretta nel fuso polimerico. Lo studio contiene dati relativi sull'influenza del metodo di introduzione e della quantità di riempitivo sull'usura, il carico applicato e la velocità di scorrimento, l'analisi del meccanismo di usura attraverso l'utilizzo della microscopia elettronica a scansione SEM.

Per quanto riguarda il coefficiente di attrito lo studio ha dimostrato che nel caso di una quantità relativamente bassa di caolino in UHMWPE questo diminuisce all'aumentare della quantità

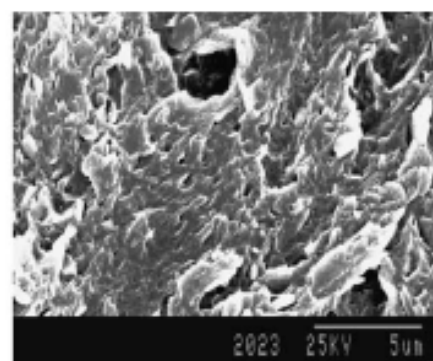
di carica , mentre per quantità relativamente alte l'aumento della carica produce l'effetto opposto. Quando il caolino viene introdotto durante il processo di polimerizzazione del UHMWPE il punto in cui il coefficiente di attrito raggiunge il minimo corrisponde ad una percentuale di riempitivo pari al 20% ed ha un valore che rappresenta 87% del coefficiente di attrito del UHMWPE puro, mentre nel caso in cui il caolino viene aggiunto al fuso polimerico e miscelato la diminuzione del coefficiente di attrito con la variazione della quantità di riempitivo non è così ovvia.

Anche la resistenza all'usura dipende dal metodo di fabbricazione del composito ed maggiore nella situazione in cui il caolino è stato aggiunto durante la polimerizzazione rispetto alla miscelazione diretta. Per un contenuto di caolino pari al 20% il tasso di usura del composito UHMWPE/caolino per polimerizzazione ha un valore del 56% del tasso di usura del UHMWPE puro avente lo stesso peso molecolare. Per il composito UHMWPE/caolino per miscelazione il contenuto di caolino ha un'influenza relativamente scarsa sulla variazione del tasso di usura ed il tasso di usura più basso ottenuto è di 85% del valore del UHMWPE puro e corrisponde ad una percentuale di 17% di riempitivo.

Le differenze in coefficiente di attrito e resistenza all'usura tra i due compositi UHMWPE/caolino ottenuti per polimerizzazione e miscelazione rispettivamente sono legate strettamente alla loro struttura interna. La struttura cristallina della matrice è diversa a causa del metodo di fabbricazione diverso. Come si può anche intuire la struttura cristallina della matrice del composito UHMWPE/caolino per miscelazione è molto simile alla struttura del UHMWPE puro e cioè di tipo sferico, mentre per il composito UHMWPE/caolino per polimerizzazione la struttura cristallina della matrice ha l'aspetto di strati intrecciati che è molto utile nella formazione di uno strato sottilissimo che lega le controparti allo strato di usura del composito.



(a) UHMWPE+24%Kaolin, Mixing



(b) UHMWPE+24%Kaolin, Polymerization

Figura 5.1 Immagine SEM frozen fracture

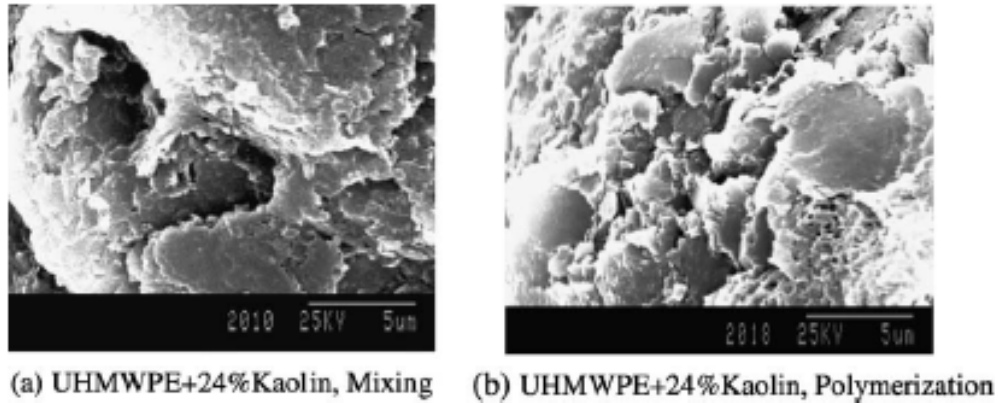


Figura 5.2 Immagine SEM stretched fracture.

Per concludere possiamo affermare che l'introduzione del caolino nel UHMWPE presenta due aspetti: uno positivo fino al 17-20% in peso quando l'aggiunta di riempitivo modifica la struttura cristallina e rende difficile il movimento delle catene polimeriche aumentando il grado di reticolazione, e uno negativo quando il caolino contenuto supera una certa soglia e la percentuale di difetti provocati dall'aggregazione dei grani di caolino è sufficientemente elevata.

Uno sguardo al futuro

Perché i nanocompositi polimerici?

Generalmente l'introduzione di un rinforzo da una parte porta ad un miglioramento di alcune proprietà della matrice ma nello stesso tempo al peggioramento di qualcun'altra. Così l'aggiunta di fibre di carbonio ad elevato modulo ma fragili ad una matrice polimerica a basso modulo porta ad un composito rigido e leggero che può possedere effettivamente una certa resistenza, ma con un costo più elevato in termini di fabbricazione. Il caricamento di un polimero termoplastico con particelle molto rigide porterà ad un aumento del modulo, ma è possibile che riduca la resistenza agli urti nello stesso tempo. La dispersione di inclusioni di gomma in una matrice dura, trasparente ma fragile conferirà una resistenza migliore agli urti, ma il prezzo da pagare è spesso una perdita di trasparenza. La grande differenza quando si utilizzano particelle molto piccole, o almeno, particelle con una dimensione nanometrica, è che si possono eliminare gli effetti negativi introdotti dalla carica rinforzante.

Una prima ragione piuttosto banale è che, su scala dimensioni nanometriche, certi fenomeni indesiderati cominciano a diminuire. Un esempio è la diffusione della luce, o la concentrazione dei difetti intorno alle inclusioni, che è meno pronunciata nel caso di inclusioni molto piccole,

limitando quindi qualsiasi indebolimento del materiale. Il rafforzamento del campo elettrico reagisce nello stesso modo se la dimensione è ridotta, migliorando così la resistenza alla rottura del dielettrico.

La seconda ragione, più sottile è che, le proprietà della matrice vengono modificate in uno spazio non trascurabile vicino ad una superficie solida (per una distanza di oltre alcuni nanometri, ad esempio). Tenendo conto dell'enorme area di interfaccia tra nanofiller e matrice significa che le proprietà della matrice possono essere modificate su una frazione volumetrica significativa. La logica non è più quella di una miscela semplice. In altre parole, una matrice con proprietà di massa viene sostituita da una con proprietà ampiamente interfacciale. È facile vedere come alcune percentuali di particelle con elevata superficie specifica possono modificare le proprietà in tutto il volume del matrice.

Vi è una terza spiegazione, piuttosto vicina a l'ultima: si tratta dell'effetto confinamento, particolarmente forte nel caso di particelle in forma di piastrine. Quando queste hanno lo spessore sulla nanoscala, è sufficiente una bassa frazione volumetrica per ottenere distanze medie tra le particelle dello stesso ordine di grandezza del raggio di girazione delle macromolecole. La matrice polimerica è come se fosse tagliata a fette sempre più fini all'interno delle quali sono confinate le macromolecole di polimero, in interazione con due superfici solide. Il numero di conformazioni che le catene polimeriche possono adottare, e quindi la loro entropia, è tanto più ridotta quanto più grande è il confinamento.

L'incorporazione di nanoriempitivo migliora le proprietà rispetto al polimero puro o al composito classico a causa della zona di interfaccia elevatissima dando la possibilità di produrre dei materiali multifunzionali e/o avere dei risultati spettacolari: aumentare il modulo elastico di una resina vetrosa di un fattore di dieci senza renderla più pesante, triplicare la resistenza alla rottura di un elastomero, migliorare il comportamento termico di un oggetto fatto da un polimero termoplastico, raddoppiare la durata di resistenza al fuoco, per ridurre la permeabilità all'ossigeno di un film di un fattore dieci.

Tutte queste cose sono state rese possibili incorporando una piccola percentuale di nanoparticelle di composti inorganici in una matrice polimerica. La figura 5.6 illustra un nanocomposito che è stato ottenuto incorporando nanotubi di carbonio in una matrice polimerica.

La maggiore difficoltà per la produzione su larga scala e commercializzazione dei nanocompositi è l'assenza di metodi convenienti per controllare la dispersione delle nanoparticelle nella matrice polimerica.

I fattori che influenzano i polimeri nanocompositi sono:

- i metodi di sintesi, come fusione del compounding, fusione solvente, polimerizzazione in-situ;
- la morfologia dei polimeri nanocompositi;
- i tipi di nanoparticelle e i loro trattamenti superficiali;
- la matrice polimerica come cristallinità, peso molecolare, chimica dei polimeri, e se termoplastico o termoindurente.

5.2 Nanocomposito UHMWPE/MMT

La montmorillonite (MMT) (chiamato anche nanoclay), come la caolinite, è un minerale della famiglia delle argille smectite, la cui struttura interna è costituita da piastre di alluminosilicato idrato a strati che sono caricate negativamente e hanno uno spessore di pochi nanometri (0,7-2,5nm). I tetraedri silicei si legano attraverso tre dei quattro vertici e possono dar luogo a strutture planari, mentre l'ossido di alluminio idrato forma invece degli ottaedri che, a loro volta, possono organizzarsi in una distribuzione planare estesa esagonale.

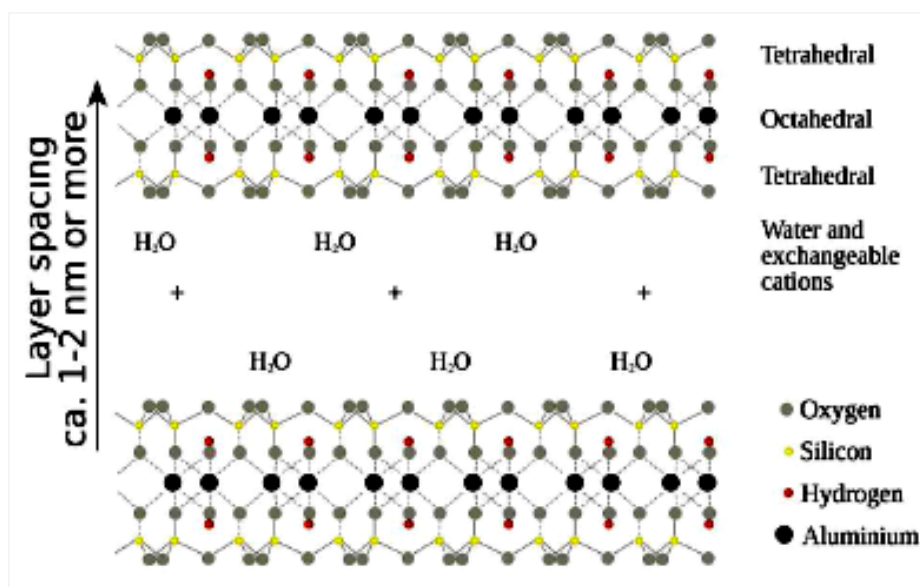


Figura 5.3 Struttura interna della montmorillonite.

Nella caolinite il rapporto tra gli strati di silice e quelli di allumina è 1:1 e i foglietti, costituiti da due strati, si legano tra di loro con legami secondari formando delle strutture “a mazzo di carte”. Per quanto riguarda la montmorillonite il rapporto tra gli strati di silice e quelli di

allumina è 2:1 in cui due strati di tetraedri chiudono a “sandwich” uno strato di ottaedri. Questi strati sono impilati e lo spazio interstrato (un gap, chiamato anche d-spacing, di 1,2 nm) è occupato con molecole di acqua e cationi inorganici, specialmente Na^+ . Questi cationi, che sono di piccole dimensioni, possono essere sostituiti utilizzando tecniche di scambio ionico da cationi più grandi (ad esempio sali di ammonio quaternario) che possono spingere le piastrine di alluminosilicato da una parte e dall'altra, aprendo lo spazio interstrato. Usando questa strategia, minerali come montmorillonite possono essere espansi.

Poiché i silicati stratificati sono materiali idrofili, devono essere trasformati in organofili (idrofobi) per renderli compatibili con la maggior parte dei polimeri ospitanti che sono polimeri idrofobi. Il trattamento organico in genere viene eseguito tramite scambio ionico tra i cationi inorganici alcalini sulla superficie dell'argilla ed il catione organico desiderato. Il nanoclay trattato viene chiamato anche organo-nanoclay. I tensioattivi più utilizzati sono i sali di ammonio quaternario.

La preparazione di nanocompositi polimero-argilla è chiaramente illustrato in fig. 2,4. Secondo lo stato fisico del polimero, si può incorporare l'argilla nel polimero per miscelazione da soluzione, per miscelazione da fusione, o attraverso processi di polimerizzazione in situ per formare nanocompositi polimero-argilla.

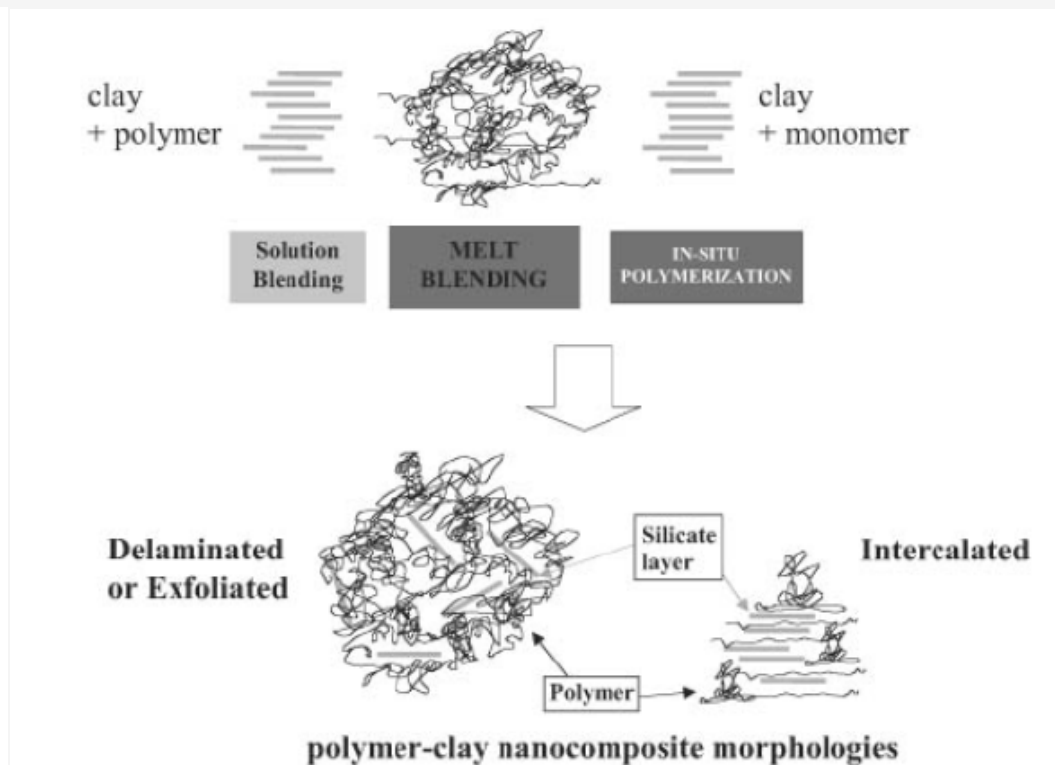


Figura 5.4 Rappresentazione schematica della morfologia del nanocomposito polimero-argilla.

I nanocompositi polimero-argilla possono essere classificati dal punto di vista della morfologia in: (a) non miscelati, (b) intercalati, e (c) esfoliati, come mostrato in fig. 2,5. Lo stato morfologico più desiderato per il nanocomposito polimero-argilla è l'esfoliazione, seguita dall'intercalazione.

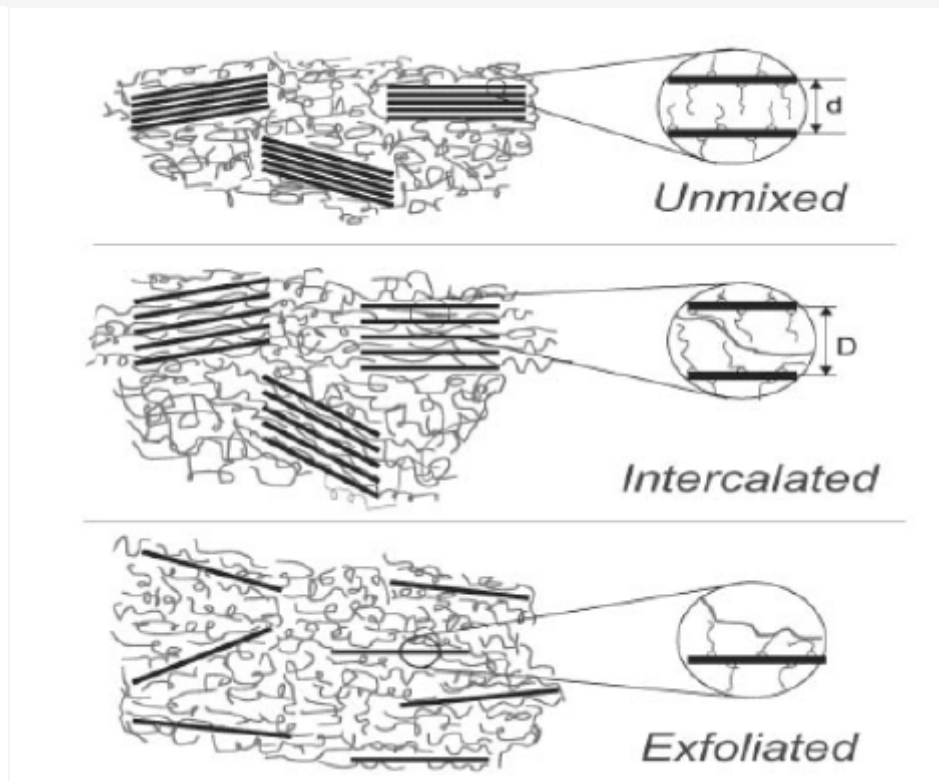


Figura 5.5 Illustrazione schematica dei gradi di miscelazione polimero-argilla.

5.3 Nanocomposito UHMWPE/nanotubi di carbonio

I nanotubi di carbonio grazie alle loro proprietà meccaniche (la resistenza alla trazione e la rigidità sono molto elevate), elettriche e termiche hanno catturato l'attenzione dei ricercatori di tutto il mondo negli ultimi anni e, attualmente, sono considerati come un potenziale materiale riempitivo per molte matrici polimeriche.

Generalmente i nanotubi di carbonio si trovano in due forme: a parete singola (Single Wall Carbon Nanotubes – SWCNTs) e parete multipla (Multi-Walled Carbon Nanotubes – MWCNTs). Quelli a parete singola si presentano in generale come un foglio di grafene incurvato fino a formare una superficie cilindrica e la loro struttura è determinata dal orientamento del foglio di grafene e dalla direzione di curvatura. SWCNTs possono avere dimensioni così piccole a partire da un diametro di 0,4nm per arrivare fino a diametri normalmente non più grandi di 2nm. MWCNTs invece sono formati da alcuni nanotubi a parete singola disposti in modo concentrico e dal punto di

vista della dimensione si trovano nel intervallo 5 – 100nm con un interspazio tra due SWCNTs adiacenti di 0,34nm approssimativamente come si può osservare anche nella figura sotto.

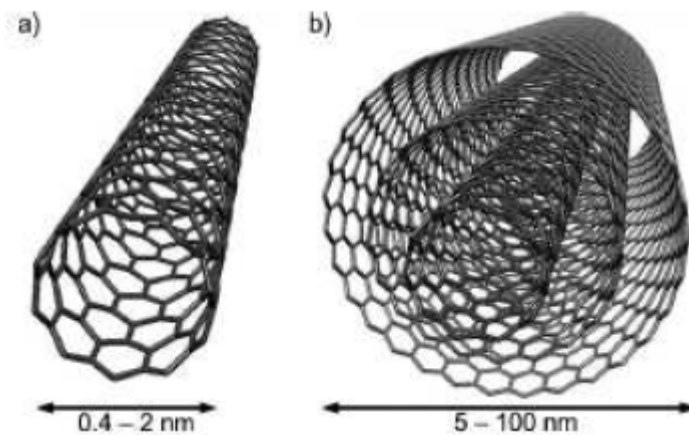


Figura 5.6 Illustrazione schematica delle due forme in cui si presentano i nanotubi di carbonio:

a.) Single Wall Carbon Nanotubes – SWCNTs e

b.) Multi-Walled Carbon Nanotubes – MWCNTs.

I risultati ottenuti negli studi recenti hanno mostrato che l'aggiunta di SWCNTs fino a 0,2% in peso migliora in modo significativo proprietà meccaniche di una matrice polimerica quale UHMWPE come durezza (aumento di 66%) e modulo di elasticità (aumento di 58%). Grazie a queste proprietà ed in più il basso costo, il basso peso specifico e la facile tecnologia si è subito pensato all'utilizzo dei film polimerici rinforzati in applicazioni tribologiche per migliorare la resistenza all'usura dei vari componenti.

Il UHMWPE puro è un tipo di film polimerico che ha mostrato risultati promettenti nel miglioramento del coefficiente di attrito e della resistenza all'usura quando viene applicato su supporti di Si, Al e acciaio. Nonostante le sue eccellenti proprietà l'utilizzo del UHMWPE in applicazioni esigenti è stato limitato a causa di vari vincoli quali la sua bassa capacità di sopportare carichi e la sua instabilità termica. Un valido approccio per superare questi vincoli e l'aggiunta di rinforzi come SWCNTs.

Diversi studi hanno dimostrato che l'aggiunta di CNTs determina un notevole aumento della resistenza alla trazione e del modulo elastico della matrice polimerica, ma uno in particolare si riferisce al miglioramento delle proprietà tribologiche di uno substrato di acciaio rivestito con UHMWPE rinforzato.

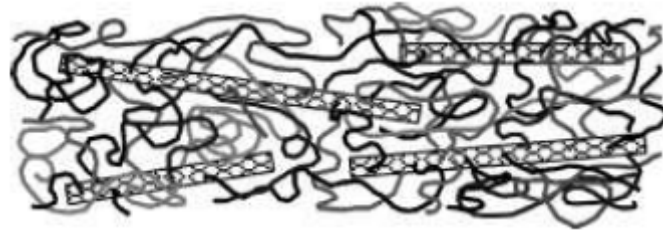
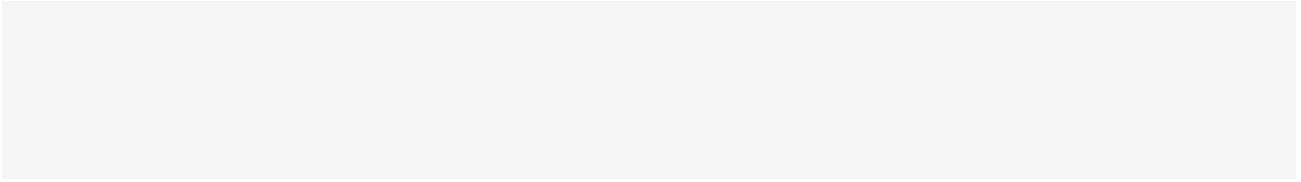


Figura 5.6 Rappresentazione schematica del nanocomposito polimero-nanotubi di carbonio.

Il miglioramento complessivo può essere attribuito alle eccezionali proprietà dei SWCNTs che contribuiscono al miglioramento delle proprietà meccaniche del film senza indurre modifiche strutturali nella matrice polimerica. Per aumentare la forza di adesione tra matrice e rinforzo i nanotubi di carbonio vengono trattati al plasma che aiuta a generare la formazione di radicali contenenti l'ossigeno sulla loro superficie. Ciò mantiene il polimero intatto impedendo il peeling-off o la delaminazione del film dal substrato.

Il modulo elastico è il parametro fondamentale che governa le caratteristiche di usura del polimero: con l'abbassamento del modulo elastico la mobilità delle catene polimeriche aumenta grazie ai legami intermolecolari più deboli il che provoca una riduzione del tempo di rilassamento (il tempo necessario perché le macromolecole del polimero conseguano la conformazione di equilibrio richiesta da una variazione di temperatura o imposta da una sollecitazione meccanica) ed il polimero è incline a subire danni a causa del effetto termico e della superficie di contatto. Si osserva che il rinforzo con SWCNTs fa aumentare proprio il modulo elastico ed in più migliora la stabilità termica. Una migliore conducibilità termica aiuta la rapida dissipazione del calore di attrito e impedisce anche la degradazione termica permettendo l'utilizzo a temperature di esercizio leggermente superiori. Così la maggiore capacità portante accoppiata con una migliore stabilità termica conduce alle eccezionali proprietà tribologiche del film sopra descritto.

Gli studi hanno mostrato che una carica fino a 0,2% in peso di SWCNTs provoca anche un leggero aumento del coefficiente di attrito da 0,08 del UHMWPE puro fino a 0,16 del UHMWPE rinforzato con SWCNTs il che lo rende ideale in applicazioni tribologiche avanzate come cuscinetti, ingranaggi, camme, pistoni, ecc. mentre risulta poco adatto in applicazioni come la nostra dove il coefficiente di attrito è un requisito fondamentale mentre la resistenza all'usura e la stabilità termica passano in secondo piano.



Bibliografia

1. M.F. Ashby, "Materials Selection in Mechanical Design", 2ndEd.
2. Mahmoud Farag, "Materials and Process Selection for Engineering Design"
3. Rolf Sandström, "Criteria in Material Selection"
4. Ernest H. Forman, "Decision by Objectives"
5. Research Group on the Wear of Engineering Materials, "Friction, Lubrication and Wear – Terms and Definition"
6. J. K. Lancaster, "Abrasive wear of polymers"
7. J. K. Lancaster, "Relationship between the wear of polymers and their mechanical properties"
8. L. E. Nielsen, "Mechanical Properties of Polymers"
9. S. Dj. Mesarovic, N. A. Fleck, "Friction indentation of dissimilar elastic – plastic spheres"
10. Gong Guofang, Yang Huayong, Fu Xin, "Tribological properties of kaolin filled UHMWPE composites in unlubricated sliding"
11. G. Guofang, W. Xin, Q. Jinxing, Q. Zongneng, "A study on friction and wear properties of two kinds of UHMWPE/kaolin composites under dry sliding"
12. T. S. Barrett, G. W. Stachowiak, A. W. Batchelor, "Effect of roughness and sliding speed on the wear and friction of UHMWPE."
13. Y. Q. Wang, J. Li, "Sliding wear behavior and mechanism of ultra-high molecular weight of polyethylene"
14. M. Abdul Samad, Sujeet k Sinha, "Mechanical, thermal and tribological characterization of a UHMWPE film reinforced with carbon nanotubes coated on steel"

Ringraziamenti

Scrivere la pagina di ringraziamenti è molto più difficile di quanto non sembra per tanti motivi. Il primo è perché le parole tendono a mancare, il secondo perché tantissime persone hanno contribuito a formare la persona che oggi sono ed è impossibile elencarle tutte in una pagina o poco più. Un altro ancora è perché anche con l'enorme gioia di tagliare un traguardo importante come una laurea, si ha sempre paura di perdere qualcosa, ad esempio gli amici "colleghi" di questi anni, il contatto con il mondo universitario, l'ambiente stesso di un'esperienza che costituisce una parte di vita fondamentale.

Il lavoro condotto per questa tesi è necessariamente non completo, o meglio, sono molte le cose che si possono affinare e sviluppare. Molte sono le cose che mi sarebbero piaciute approfondire, ma si sa prima o poi "si chiude" per iniziare un dopo e questa tesi io l'ho vista soprattutto come una mia manifestazione personale per il dopo, per quello che mi piacerebbe fare in seguito, insomma come un'introduzione al mio futuro, uno "statement of purpose"!

Spero di aver dato delle conferme e di essere stato all'altezza di quanto mi è stato chiesto di fare, di certo l'impegno e la passione da parte mia non sono mancati. Il tempo già ridotto è volato come sempre; in ogni caso ho cercato di puntare al massimo di me stesso.

Ringrazio innanzitutto la Bedeschi Spa per avermi offerto un'enorme aiuto (un supporto tecnico adeguato, il permesso di utilizzare materiale di proprietà dell'azienda) senza del quale la realizzazione di questa tesi sarebbe stata impossibile.

Ringrazio il mio relatore, il Prof. Manuele Dabalà per l'appoggio e la fiducia accordata durante l'intero percorso universitario ed in particolar modo durante lo svolgimento di questo elaborato.

Ringrazio inoltre il mio correlatore, Fabio Orobelli, per i suoi pazienti insegnamenti, le risposte a tutti i miei dubbi, e gli aiuti, senza i quali la tesi non avrebbe prodotto alcun risultato.

Il ringraziamento più grande va alla mia moglie Roxana che mi ha dato la possibilità di studiare con serenità e ha sempre appoggiato le mie scelte, consigliandomi ogni volta la strada giusta da percorrere.

Ringrazio infine tutte le persone che in qualche modo mi sono state vicine in questi anni ed hanno creduto in me.

Spero di non aver disturbato troppo nessuno, e spero inoltre di poter continuare in futuro ad applicarmi in tali ambiti e con le stesse persone con le quali ho avuto il piacere e l'onore di lavorare per questa tesi, che magari potrebbe sembrare un tantino avventurosa agli occhi di molti...ma è stata di gran lunga un'enorme soddisfazione che ripeterei fin da ora!

Indice

Capitolo 1. Introduzione	3
Capitolo 2. Fondamenti teorici	11
2.1. Attrito	12
2.2 Usura	18
2.3 Dilatazione termica	20
2.4 Durezza e microdurezza	23
Capitolo 3. Criteri di selezione di un materiale	27
3.1 Presentazione generale	27
3.2 Scelta preliminare	29
3.3 Breve presentazione delle caratteristiche meccaniche e termiche di materiali scelti	38
3.4 Determinazione sperimentale del coefficiente di frizione	44
Valutazione qualitativa della resistenza all'abrasione	
Capitolo 4. Selezione multipla con obiettivi concorrenti	47
4.1 Analytical Hierarchy Process (AHP)	47
4.2 Statistica Digital Logic ed Enhanced Digital Logic	51
4.3 Tivar [®] 88 – scelta definitiva	52
Capitolo 5. Possibilità di miglioramento delle caratteristiche del UHMWPE	59
5.1 Composito UHMWPE/caolino	59
5.2 Nanocomposito UHMWPE/MMT	63
5.3 Nanocomposito UHMWPE/nanotubi di carbonio	65
Bibliografia	69
Ringraziamenti	71