

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Nanoricoprimenti antiusura: realizzazione e analisi



Relatori:

Prof. Andrea Mura

Prof.ssa Francesca Maria Curà

Candidato:

Serena Bariosco

Anno Accademico 2019/20

Indice

	Pag.
1. Abstract	7
2. Introduzione	8
3. Prove sperimentali pin on disc con tribometro	10
3.1 Provini rame-grafene	11
3.2 Provini alluminio-grafene	19
3.3 Provini alluminio-grafene fino a rimozione di grafene	22
3.4 Calcolo volumi di usura	24
3.5 Risultati	25
4. Simulazione prove pin on disc tramite Ansys	37
4.1 Introduzione allo studio tramite elementi finiti	37
4.2 Le variabili che influenzano l'usura	37
4.3 Il modello dell'usura di Archard	39
4.4 Il calcolo di Ansys	40
4.5 Caso di studio: pin on disc. Costruzione del modello	43
4.6 Costruzione dello strato di grafene	58
5. Confronto dati sperimentali e simulati	61
5.1 Risultati sperimentali	63
5.2 Risultati Ansys: senza ricoprimento	64
5.3 Risultati Ansys: fino a rimozione di grafene	71
6. Conclusioni	74
7. Bibliografia	75
8. Sitografia	76
9. Ringraziamenti	77

1. Abstract

Il seguente lavoro di tesi si prefigura come una descrizione del fenomeno dell'usura nei componenti meccanici e ne analizza il comportamento, includendo lo studio di ricoprimenti a base di grafene, innovativi e nuovi nel panorama industriale odierno.

La ricerca è stata condotta sia sul piano sperimentale, effettuando prove tribologiche in laboratorio, sia utilizzando il software a elementi finiti ANSYS®, allo scopo di comparare i risultati ottenuti e verificarli computazionalmente, con l'applicazione della teoria dell'usura reperita in letteratura.

2. Introduzione

Negli anni recenti ridurre attrito e usura associati a malfunzionamento di sistemi meccanici ha guadagnato attenzione a causa dell'impatto con efficienza, durabilità e componente ambientale. Nonostante l'applicazione del grafene come materiale promettente in numerosi campi, il suo uso è stato per molto quasi ignoto come ricoprimento e lubrificante per tali scopi. Nell'ultimo trentennio i trasporti e altre attività industriali hanno contribuito a consumare molte delle risorse non rinnovabili; il seguente studio si prefigura quindi come importante per un futuro sostenibile: infatti, grandi perdite in termini di materiale asportato sono correlate a scarsa affidabilità del componente meccanico. A tale scopo, negli ultimi anni, si sono condotti studi per introdurre un materiale innovativo, il grafene, come lubrificante o nanoricoprimento per migliorare le prestazioni. Il grafene fu isolato stabilmente per la prima volta nel 2004; è un materiale 2D e viene impiegato in tale studio proprio per le sue caratteristiche intrinseche inusuali per materiali convenzionali: infatti proprietà meccaniche, elettriche, termiche lo hanno reso interessante non solo per l'ambito meccanico ma anche per l'ambito elettronico, essendo impiegato in sistemi microelettromeccanici (MEMS) e nanoelettromeccanici (NEMS).

Il grafene oggetto di studio è stato, in passato, dapprima impiegato come lubrificante liquido, in modo da evitare il contatto strisciante per limitare l'usura e aumentare la vita utile: è stato dimostrato che alcuni lubrificanti a base di grafene, ovvero con additivi a base di grafene addizionati al lubrificante stesso, impiegati in situazioni di contatto metallo-metallo andassero ad influenzare positivamente l'usura, diminuendo anche il coefficiente di attrito. Un altro impiego è quello rappresentato dai nanoricoprimenti: nel seguente lavoro verranno analizzate differenze tra assenza e presenza di ricoprimento di grafene su base metallica per evidenziare differenze in termini di proprietà.

Si possono identificare principalmente tre tipi di ricoprimento: CVD (Chemical Vapor Deposition), una tecnica che consiste nell'esporre una base -nei nostri casi metallica- a una soluzione gassosa, che si decompone sulla base stessa formando il ricoprimento; il grafene percolativo, ovvero grafene in fiocchi depositato come ricoprimento tramite soluzione acquosa; il grafene trasferito, una via di mezzo delle due tecniche mostrate in precedenza, che viene

prima accresciuto con tecnica CVD e, successivamente, viene utilizzato come ricoprimento grazie al galleggiamento sull'acqua.

Al fine di effettuare un confronto è stata condotta dapprima attività sperimentale e si è successivamente confrontata questa con una simulazione a elementi finiti ANSYS® che ci permettesse di calcolare il tasso di usura e, di conseguenza, il volume di materiale asportato sia in presenza che in assenza di grafene, al fine di valutare differenze e più approfonditamente studiare l'efficacia del grafene come nanoricoprimento. La simulazione CFD costituisce inoltre uno strumento importante per un risparmio di tempo e attività di laboratorio futura: attraverso questa simulazione, infatti, si può agevolmente cambiare materiale in analisi e vedere eventuali differenze con l'attività già svolta per prendere in considerazione di effettuare solo alcune specifiche prove sperimentali, evitando un lavoro dispendioso.

3. Prove sperimentali pin on disc con tribometro

Obiettivo dello studio è ottenere il volume d'usura e il coefficiente di attrito relativi a prove pin on disc realizzate presso il laboratorio Dimeas del Politecnico di Torino.

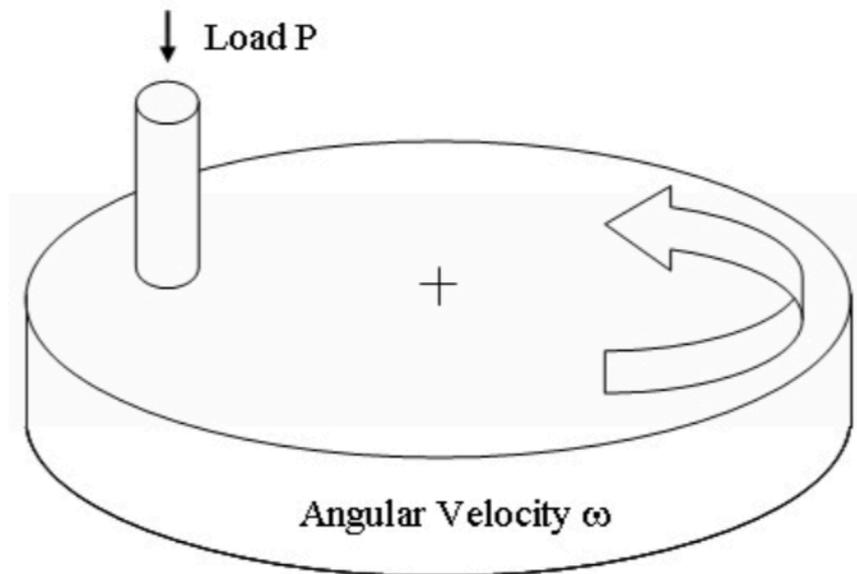


Figura 1. Immagina a titolo di esempio per rappresentazione di prova pin on disc

Per l'analisi si è scelto un provino di rame a contatto con un pin a estremità emisferica di acciaio 100Cr6 e, attraverso un tribometro, si sono valutate caratteristiche tribologiche quali coefficiente di attrito e volume di usura.

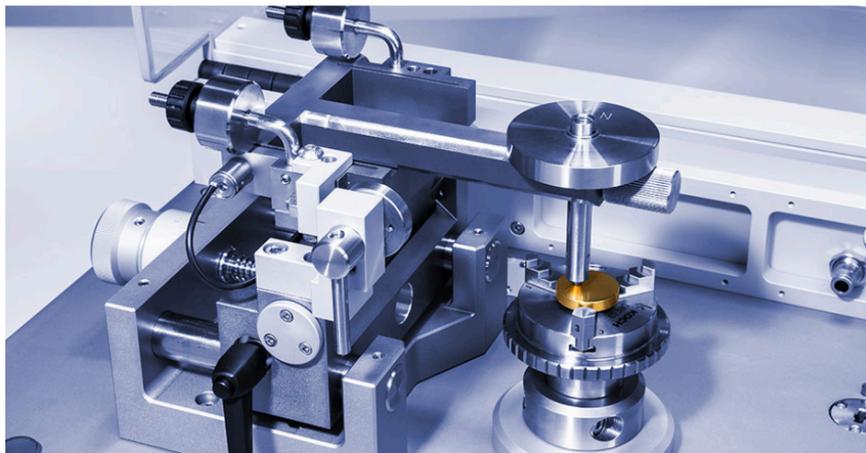


Fig 2. Tribometro per prova pin on disc

3.1 Provini rame-grafene

Il test consiste nel tenere fisso un pin e nel far rotare un disco al di sotto con una determinata velocità di rotazione.

Di seguito vengono riportati i dati del problema:

Materiale pin	Acciaio 100Cr6
Materiale disco	Rame – Rame + grafene
Diametro estremità pin	6 mm
Velocità lineare disco	1,5 cm/s
Carico applicato	2 N

Sono stati analizzati provini senza ricoprimento e provini ricoperti di grafene, al fine di valutare differenze o analogie tra i diversi casi.

In particolare, sono stati distinti i seguenti casi:

1. Provini senza ricoprimento;
2. Provini con grafene accresciuto direttamente sul rame;
3. Provini con grafene trasferito;
4. Provini con grafene percolativo sonicato 3 ore;
5. Provini con grafene percolativo sonicato 6 ore;

Coefficiente di attrito

Lo scopo è valutare se si riscontra un miglioramento in termini di volume di usura e coefficiente di attrito a causa del ricoprimento.

Lo stesso provino è stato utilizzato più volte con diverse piste di contatto, rispettivamente a raggio di 2, 3, 4 mm.

Il coefficiente di attrito μ è il rapporto tra la forza di attrito e la forza di carico normale imposta P, come segue:

$$\mu = \frac{F_{\text{attrito}}}{P}$$

Vengono riportate di seguito le tabelle relative ai dati delle diverse prove e il grafico relativo a un test di ciascuna casistica, che risulta rappresentativo della categoria.

NO GRAFENE					
Test 1		Test 2		Test 3	
r [mm]	4,00	r [mm]	3,00	r [mm]	2,00
f medio	0,7503	f medio	0,7765	f medio	0,8374
Dv.standard	0,0742	Dv.standard	0,0626	Dv.standard	0,0522

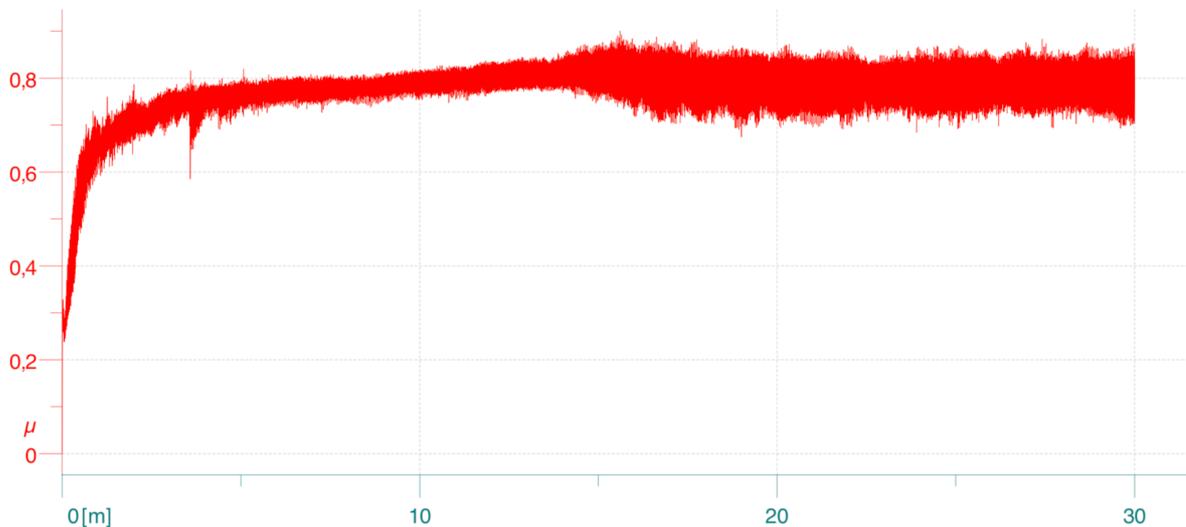


Figura 3. Andamento coefficiente d'attrito per provini in rame senza ricoprimento

In questo caso si nota un rapido raggiungimento delle condizioni di regime; dopo un iniziale valore basso del coefficiente di attrito si assiste a un rapido innalzamento al suo valore medio di circa 0,75.

CRESCITA DIRETTA					
Test 1		Test 2		Test 3	
r [mm]	4,02	r [mm]	3,00	r [mm]	2,00
f medio	0,667	f medio	0,672	f medio	0,733
Dv.standard	0,098	Dv.standard	0,098	Dv.standard	0,080

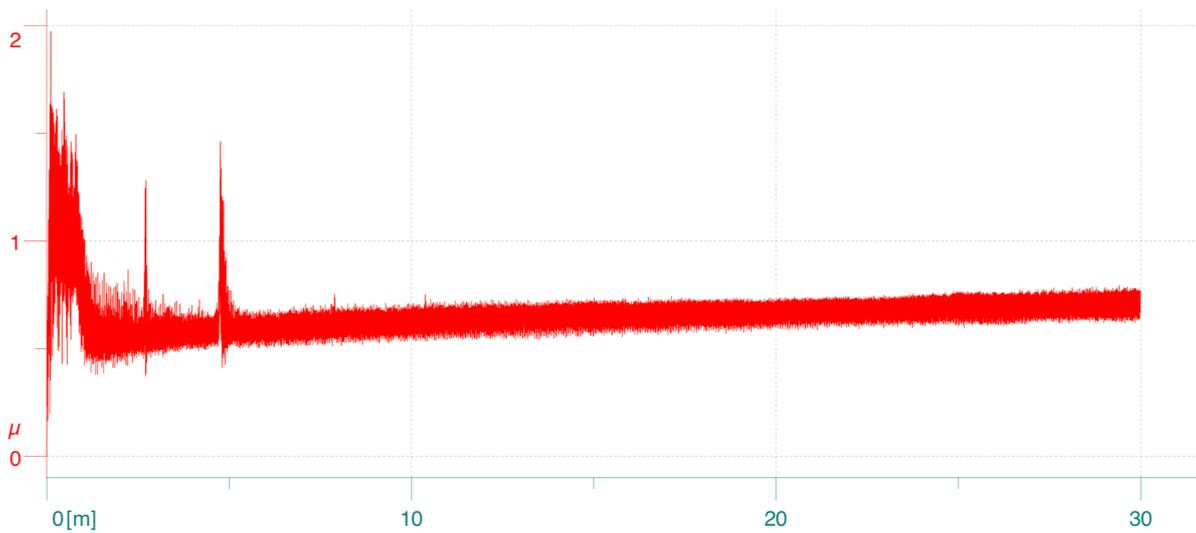


Figura 4. Andamento coefficiente d'attrito per provini in rame con ricoprimento in grafene a crescita diretta

La crescita diretta del grafene presenta nel suo tratto iniziale un picco del coefficiente di attrito dovuto probabilmente alla presenza di polvere sul provino.

GRAFENE TRASFERITO					
Test 1		Test 2		Test 3	
r [mm]	4,02	r [mm]	3,00	r [mm]	2,00
f medio	0,745	f medio	0,766	f medio	0,734
Dv.standard	0,123	Dv.standard	0,099	Dv.standard	0,086

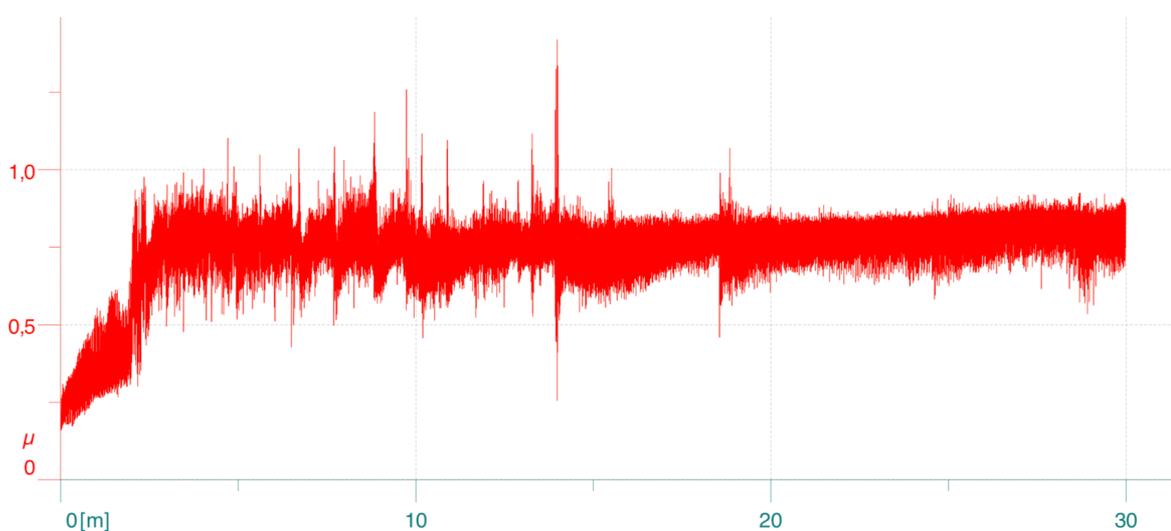


Figura 5. Andamento coefficiente d'attrito per provini in rame con ricoprimento di grafene trasferito

Il grafene trasferito presenta un andamento del coefficiente di attrito simile al provino in assenza di grafene, dal momento che presenta un piccolo tratto di transitorio prima della condizione di regime.

GRAFENE PERCOLATIVO SONICATO 3H					
Test 1		Test 2		Test 3	
r [mm]	4	r [mm]	3	r [mm]	2
f medio	0,6524	f medio	0,7111	f medio	0,7342
Dv.standard	0,2193	Dv.standard	0,1610	Dv.standard	0,1436

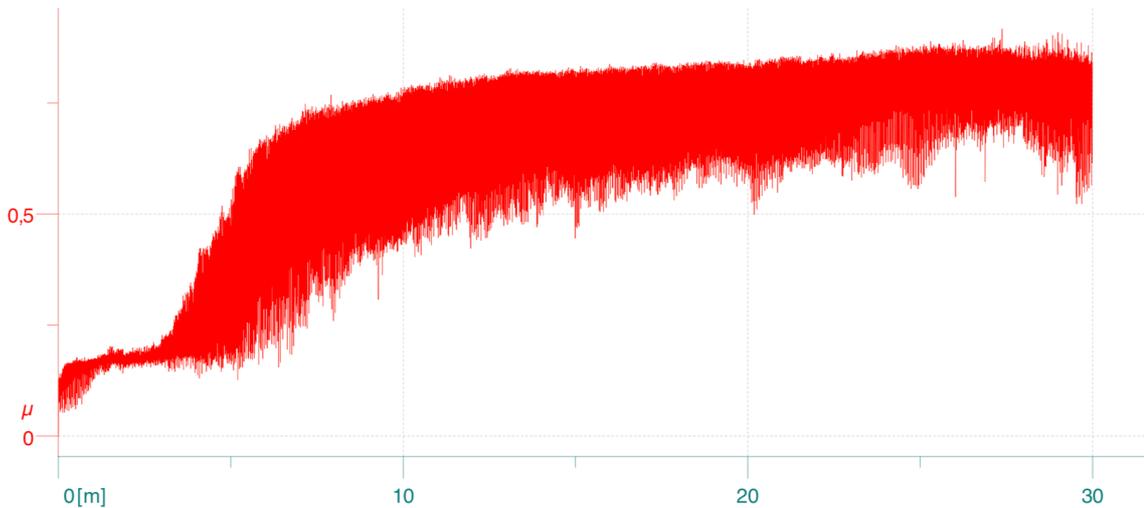


Figura 6. Andamento coefficiente d'attrito per provini in rame con ricoprimento in grafene sonicato 3 ore

Il grafene percolativo sonicato 3 ore presenta un tratto iniziale più lungo in cui il coefficiente è intorno a 0,2, poi raggiunge il suo valore di regime. Si noti come il tratto iniziale presenti un andamento senza disturbi mentre il successivo tratto presenti una notevole dispersione dei dati; ciò è dovuto al ricoprimento che viene rimosso poiché il provino è soggetto al fenomeno di usura: ciò lascia la superficie notevolmente scabra.

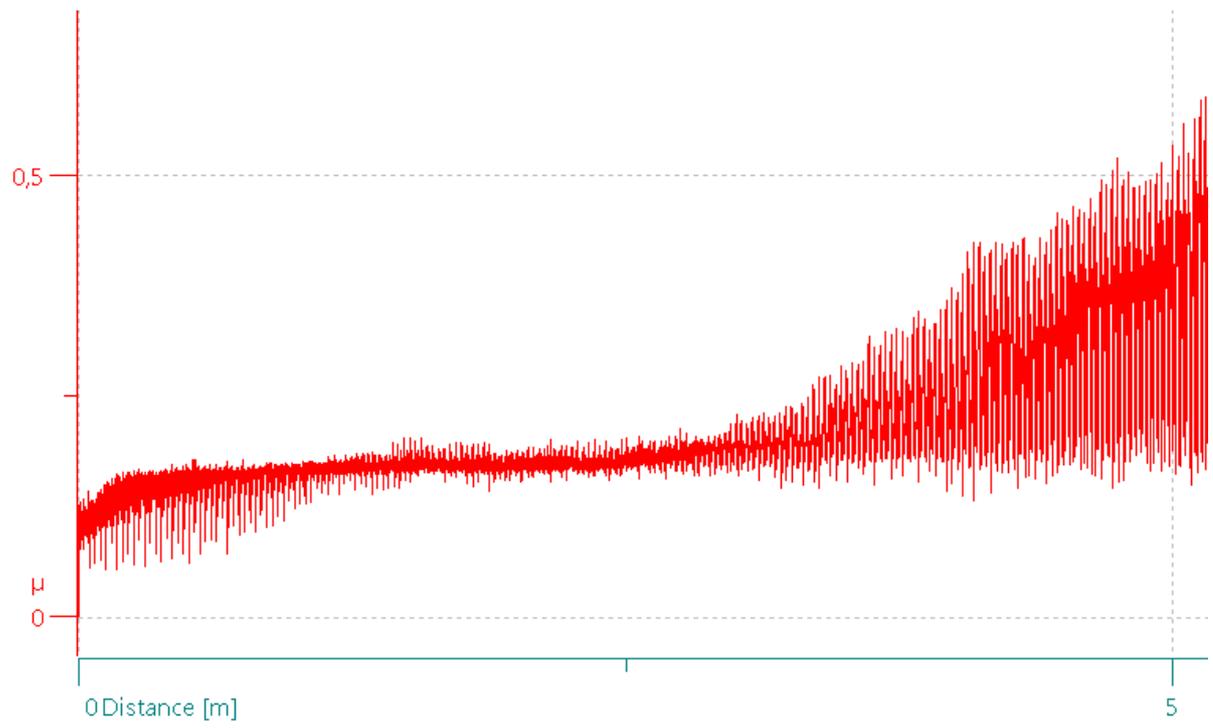


Figura 7. Un ingrandimento di Figura 6. che si sofferma sulla prima parte soggetta a ricoprimento

GRAFENE PERCOLATIVO SONICATO 6H					
Test 1		Test 2		Test 3	
r [mm]	4	r [mm]	3	r [mm]	2
f medio	0,4066	f medio	0,6384	f medio	0,6170
Dv.standard	0,2135	Dv.standard	0,2022	Dv.standard	0,2347

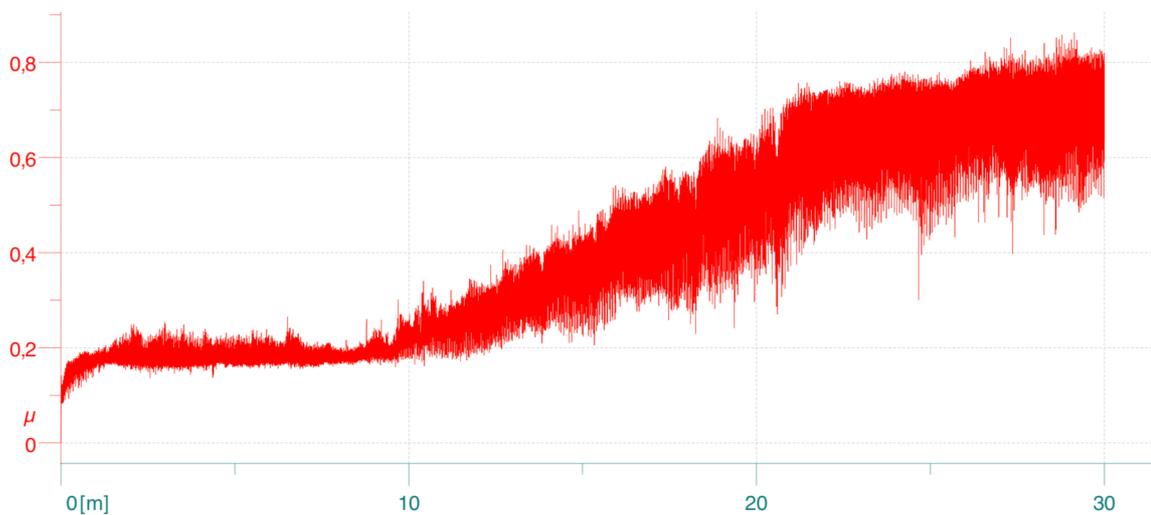


Figura 8. Andamento coefficiente d'attrito per provini in rame con ricoprimento in grafene sonicato 6 ore

Si rinnovano le considerazioni espresse per il grafico riguardante il coefficiente di attrito per il grafene sonicato 3 ore; in tale caso si osserva una zona più estesa in cui il ricoprimento è presente.

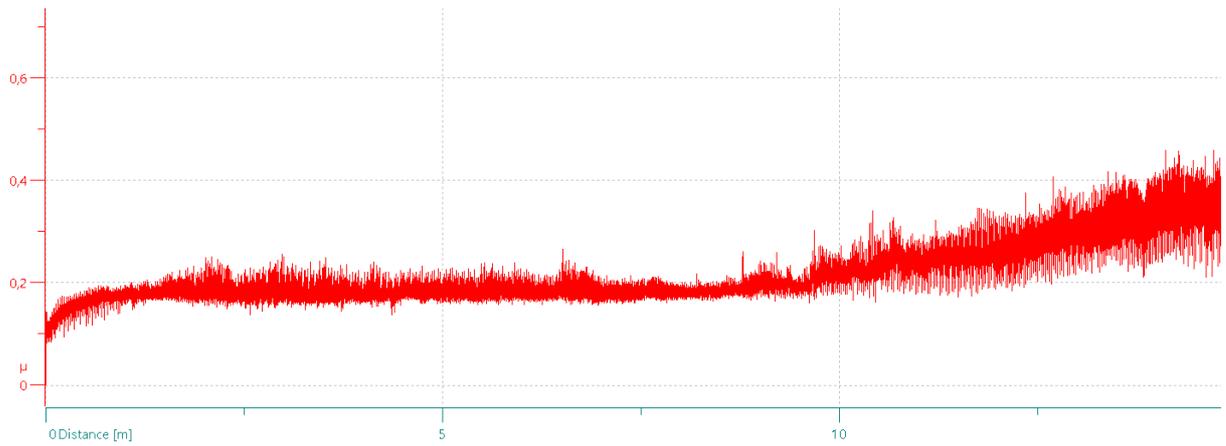


Figura 9. Un ingrandimento di Figura 8. che si sofferma sulla prima parte soggetta a ricoprimento

Il grafene sonicato 6 ore presenta un notevole tratto in cui il coefficiente di attrito è sensibilmente inferiore al valore raggiunto a regime. Tale valore viene inoltre mantenuto per un tempo più lungo rispetto alla sonicazione di soli tre ore.

3.2 Provini alluminio-grafene

Materiale pin	Acciaio 100Cr6
Materiale disco	Alluminio / Alluminio + grafene
Diametro estremità pin	6 mm
Velocità lineare disco	1,5 cm/s
Carico applicato	2 N

Sono stati analizzati inoltre provini in alluminio senza ricoprimento e con ricoprimento di grafene. Si rimanda al paragrafo precedente per ulteriori dettagli, dal momento che il calcolo di coefficiente di attrito risulta identico.

Di seguito vengono riportate le tabelle con i dati relativi alle varie prove:

NO GRAFENE					
Test 1		Test 2		Test 3	
r [mm]	3,50	r [mm]	1,00	r [mm]	2,00
f medio	0,617	f medio	0,559	f medio	0,572
Dv.standard	0,179	Dv.standard	0,130	Dv.standard	0,149

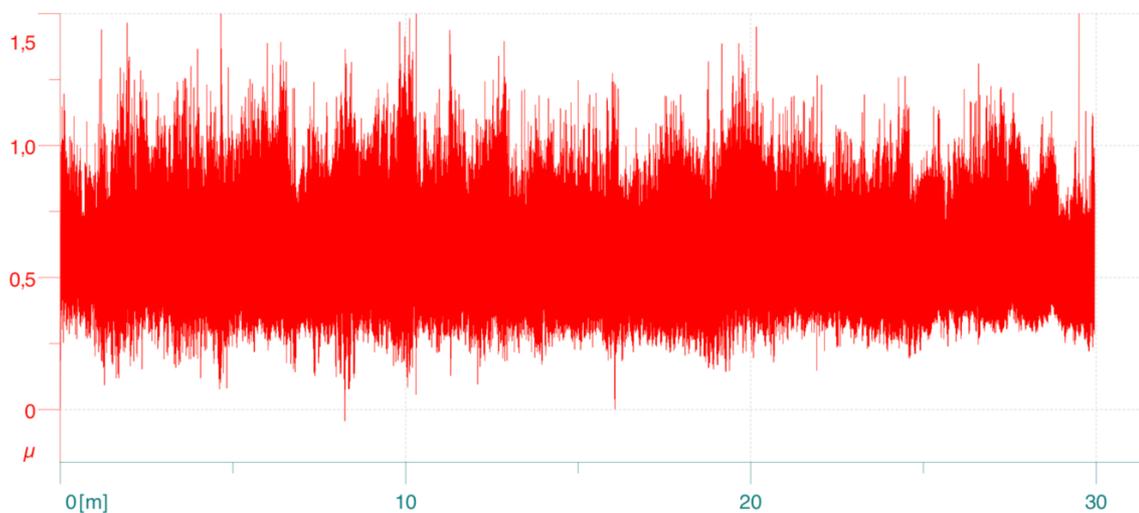


Figura 10. Andamento coefficiente di attrito per provini in alluminio non ricoperti

Dall'analisi del coefficiente attrito si può notare come i dati presentino una elevata dispersione; i fenomeni di adesione tra alluminio e acciaio sono molto intensi e si verifica il fenomeno dell'attrito adesivo.

GRAFENE PERCOLATIVO SONICATO 3H			
Test 1		Test 2	
r [mm]	4,7	r [mm]	2,5
f medio	0,579	f medio	0,569
Dv.standard	0,207	Dv.standard	0,183

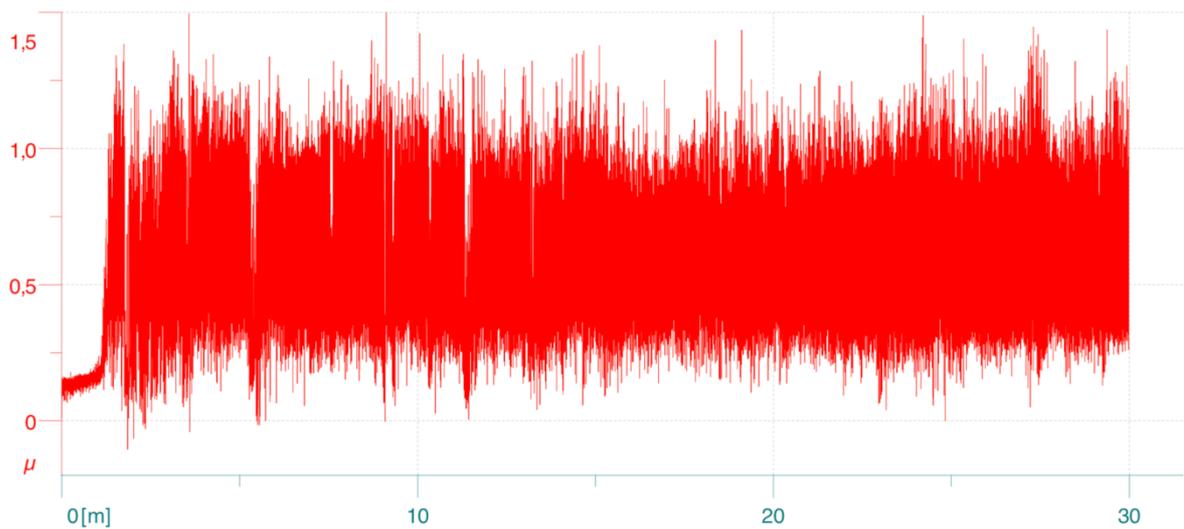


Figura 11. Andamento coefficiente di attrito per provini in alluminio ricoperti da grafene sonicato 3 ore

GRAFENE PERCOLATIVO SONICATO 6H

Test 1		Test 2	
r [mm]	4,5	r [mm]	2,3
f medio	0,585	f medio	0,576
Dv.standard	0,222	Dv.standard	0,177

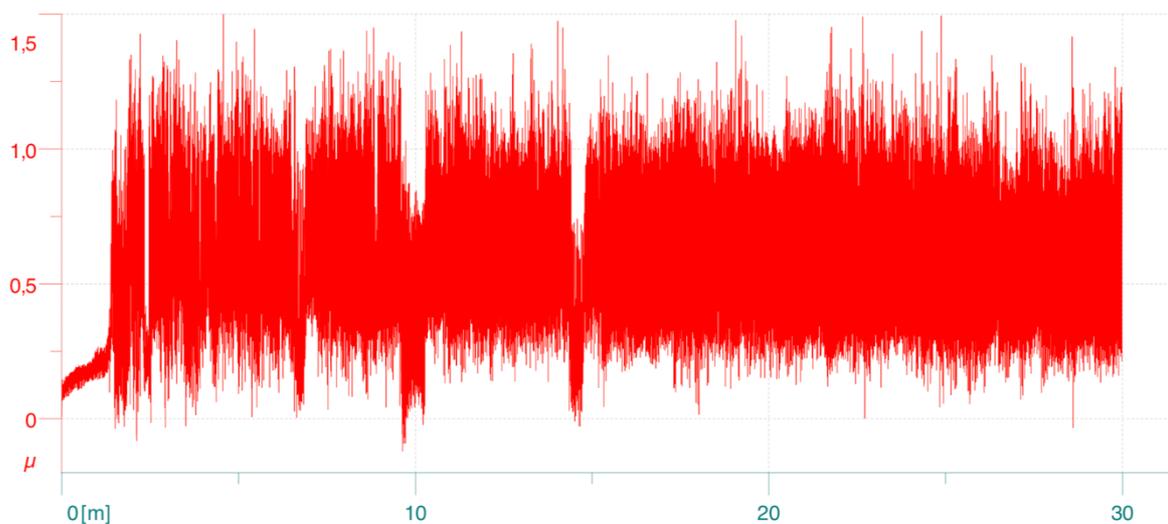


Figura 12. Andamento coefficiente di attrito per provini in alluminio ricoperti da grafene sonicato 6 ore

Come nel caso dei provini in rame ricoperti di grafene si osserva una zona in cui il coefficiente di attrito è basso per la presenza di grafene. Successivamente, quando lo strato di grafene viene asportato, si osserva un andamento del coefficiente di attrito con maggiore dispersione; si verifica così il fenomeno dell'attrito adesivo tra alluminio e acciaio.

3.3 Prove alluminio-grafene fino a rimozione grafene

Sono state eseguite prove fino alla condizione di rimozione dello strato di grafene. Questo è stato fatto poiché, come si vedrà nel capitolo successivo, non era possibile ricavare il coefficiente di usura k e il volume di usura imputato alla rimozione del solo strato di grafene ma era possibile ricavare solo il volume di usura complessivo, che per gli scopi illustrati non era un dato rilevante, dal momento che non dava informazioni riguardo l'efficacia anti usura del grafene come ricoprimento. A tale scopo si sono eseguite altre prove per provini ricoperti in grafene, sonicati rispettivamente tre e sei ore (3h e 6h) e se ne riportano le relative curve di attrito e i dati di acquisizione.

GRAFENE PERCOLATIVO 3H – RIMOZIONE GRAFENE	
Raggio [mm]	3,60
f min	0
Dv.standard	0,016

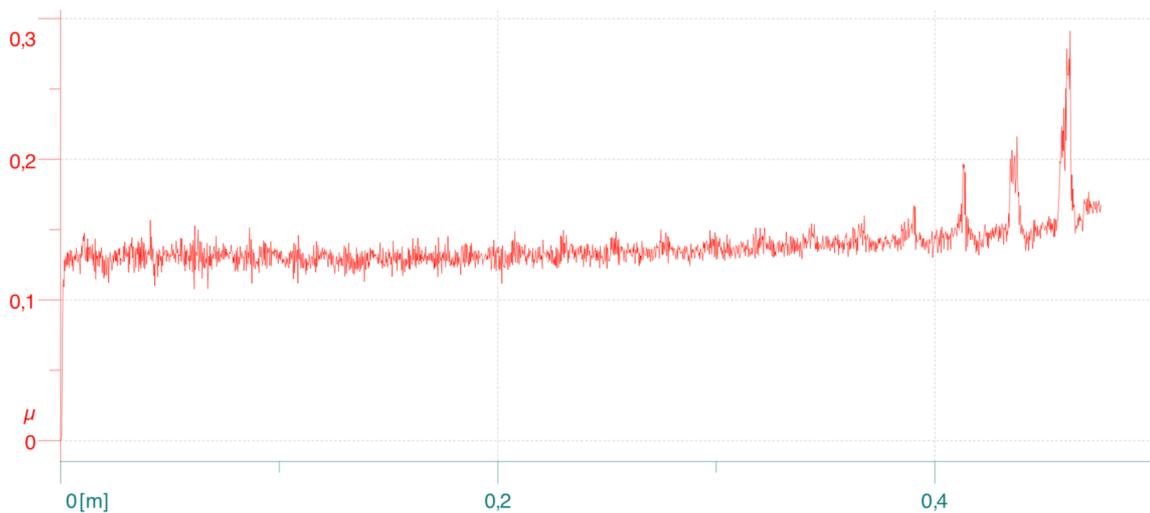


Figura 13. Andamento di coefficiente di attrito per ricoprimento con grafene sonicato 3 ore

GRAFENE PERCOLATIVO 6H – RIMOZIONE GRAFENE	
Raggio [mm]	3,4
f min	0
f max	0,281
f medio	0,183
Dv.standard	0,021
T lab [°C]	0
T target [°C]	26
Umidità %	39

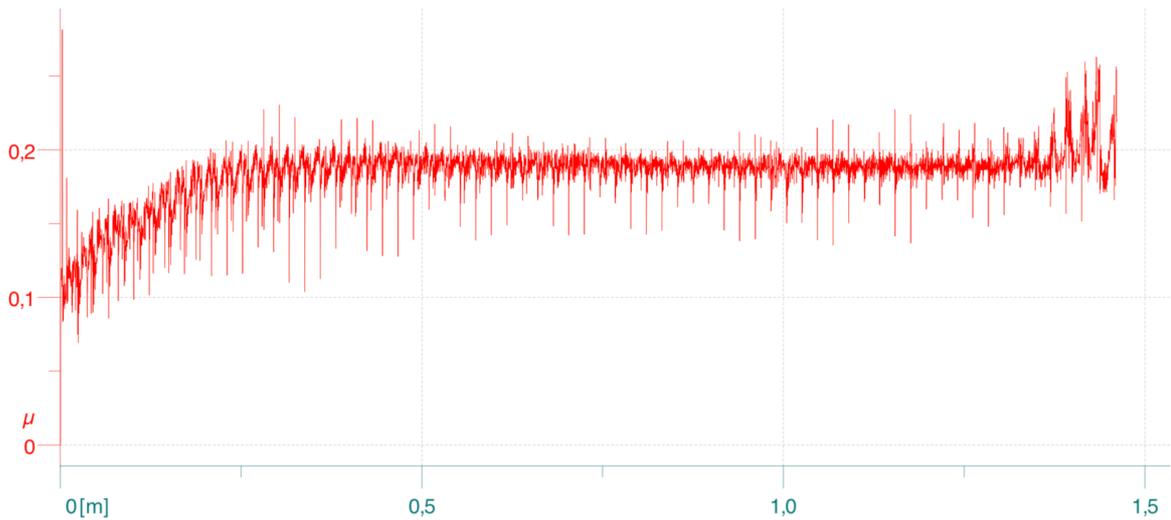


Figura 14. Andamento di coefficiente di attrito per ricoprimento con grafene sonicato 3 ore

3.4 Calcolo volumi di usura

Profili d'usura

Si è andati a ricavare l'area trasversale p dell'usura e, da essa, ci si è ricavati il volume di usura Q come:

$$Q = 2\pi rp$$

Dove r è il raggio a cui si è posizionato il pin del tribometro.

Nelle immagini seguenti vengono riportate a scopo esplicativo due immagini di tracce di usura, una per provino in alluminio non ricoperto in grafene e una per provino ricoperto a cedimento.

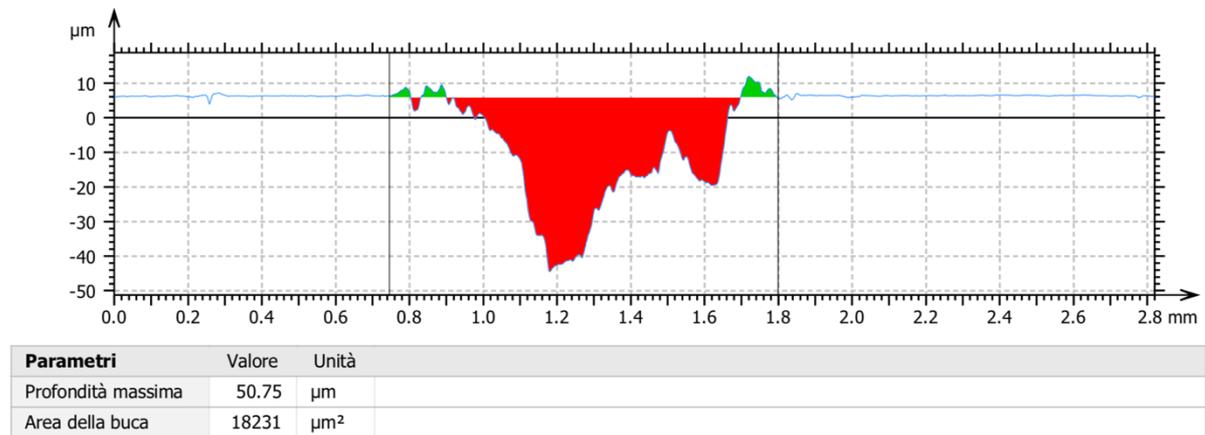


Figura 15. Traccia di usura per provino in alluminio non ricoperto

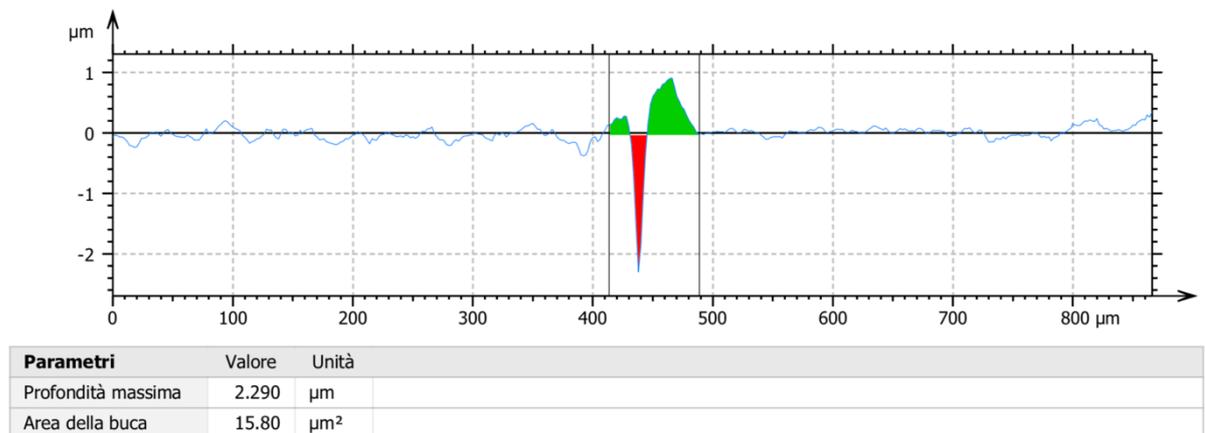


Figura 16. Traccia di usura per provino in alluminio ricoperto di grafene

Si può notare come il provino non ricoperto presenti una profondità di usura nettamente superiore rispetto ad un provino ricoperto; è da rimarcare il fatto che i provini ricoperti percorrano una distanza notevolmente inferiore (0,48 m e 1,46 m) rispetto ai provini non ricoperti (30 m) ma essi presentano a parità di distanza percorsa usura inferiore. Ciò si può notare dal coefficiente di usura K che viene ricavato nel prossimo paragrafo.

3.5 Risultati

L'obiettivo del test è la determinazione del volume di usura Q e, dalla conoscenza della lunghezza percorsa L, del carico applicato W (2 N) e della durezza H, viene ricavato il coefficiente K dimensionale e adimensionale, quest'ultimo utilizzato nella parte ad elementi finiti come variabile in ingresso.

$$Q = \frac{KWL}{H}$$

Coefficiente K dimensionale: $K' = \frac{Q}{WL}$

Coefficiente K adimensionale: $K = \frac{QH}{WL}$

	Test 1	Test 2	Test 3
Q/(L*W) [mm ³ /mN]	0,00305	0,00145	0,00360
Q/(L*W) [m ³ /mN]	3,050E-12	1,450E-12	3,600E-12
H Aluminum [MPa]	812,68	812,68	812,68
Wear coefficient K [-]	2,479E-03	1,178E-03	2,926E-03

Provini di alluminio non ricoperti

Test 1 – alluminio

Test 1		Track area [um ²]										
Duration [cicle]	Duration [m]	Track 1	Track 2	Track 3	Track 4	Track 5	Track 6	Track 7	Track 8	max tot	min tot	Diff %
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1364	30	4845	9274	9222	3848	9541	28627	22556	17558	9541	3848	59,7
	Radius	3,5	mm									

Q - Wear volume [mm ³]											
Duration [m]	Track 1	Track 2	Track 3	Track 4	Track 5	Track 6	Track 7	Track 8	Average	St.Dev.	St. Dev. %
0	0	0	0	0	0				0	0	0
30	0,1065	0,2039	0,2028	0,0846	0,2098	0,6295	0,4960	0,3861	0,1615	0,0608	37,6

Test 2 – alluminio

Test 2		Track area [um ²]										
Duration [cicle]	Duration [m]	Track 1	Track 2	Track 3	Track 4	Track 5	Track 6	Track 7	Track 8	max tot	min tot	Diff %
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4774	30	15681	11868	12123	7709	22331	14450	9859	11165	22331	7709	65,5
	Radius	1	mm									

Q - Wear volume [mm ³]											
Duration [m]	Track 1	Track 2	Track 3	Track 4	Track 5	Track 6	Track 7	Track 8	Average	St.Dev.	St. Dev. %
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0,0985	0,0746	0,0762	0,0484	0,1403	0,0908	0,0619	0,0702	0,0876	0,0344	39,3

Test 3 – alluminio

Test 3		Track area [um ²]										
Duration [cicle]	Duration [m]	Track 1	Track 2	Track 3	Track 4	Track 5	Track 6	Track 7	Track 8	max tot	min tot	Diff %
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2399	30	23163	7251	15574	6693	33810	15325	11554	3308	33810	6693	80,2
	Radius	2	mm									

Q - Wear volume [mm ³]											
Duration [m]	Track 1	Track 2	Track 3	Track 4	Track 5	Track 6	Track 7	Track 8	Average	St.Dev.	St. Dev. %
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0,2911	0,0911	0,1957	0,0841	0,4249	0,1926	0,1452	0,0416	0,2174	0,1437	66,1

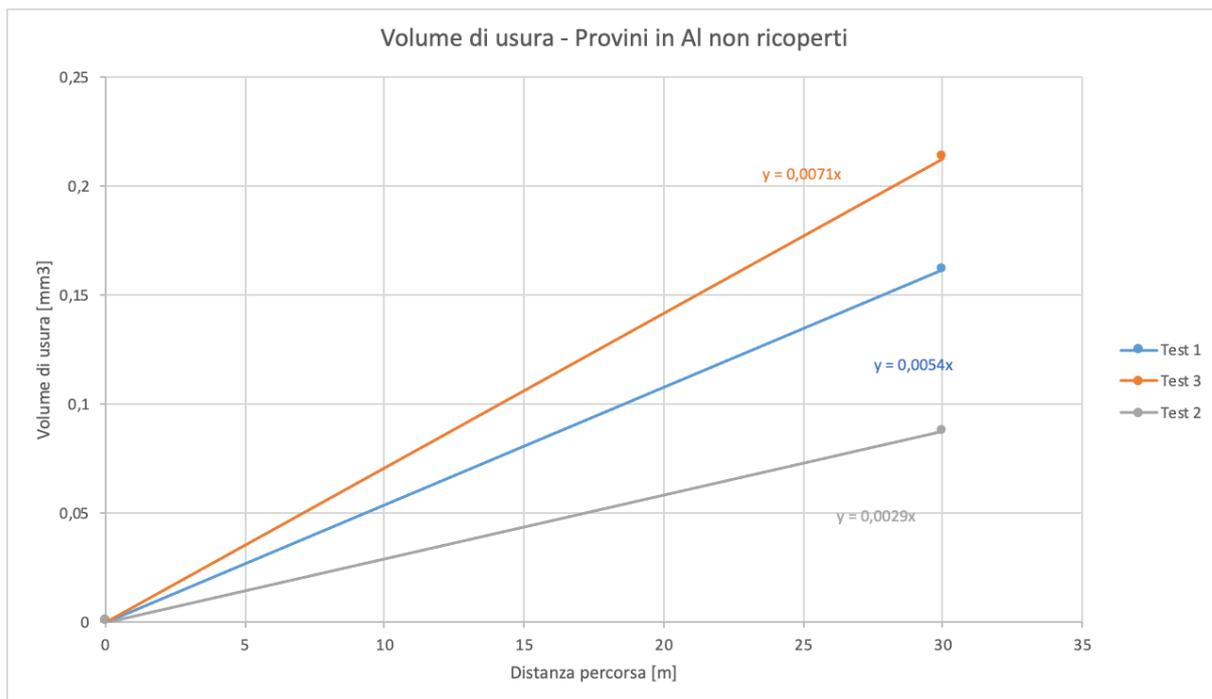


Figura 17. Andamento del volume di usura rispetto alla distanza percorsa per provini in alluminio

Sono stati condotti ulteriori test per provini sempre in alluminio ma con ricoprimento di grafene. Essendo stata mantenuta uguale la distanza percorsa (30 m) e considerato che il ricoprimento di grafene persiste per non molto tempo, si ottengono volumi di usura comparabili con i casi senza ricoprimento.

Provini in alluminio ricoperti in grafene

Grafene 3h – Test 4 e Test 5

	Test 4	Test 5
Q/(L*W) [mm ³ /mN]	0,00583	0,00271
Q/(L*W) [m ³ /mN]	5,826E-12	2,712E-12
H Aluminum [MPa]	812,68	812,68
Wear coefficient K [-]	4,735E-03	2,204E-03

Grafene 6h – Test 6 e 7

	Test 6	Test 7
Q/(L*W) [mm ³ /mN]	0,00641	0,00374
Q/(L*W) [m ³ /mN]	6,413E-12	3,736E-12
H Aluminum [MPa]	812,68	812,68
Wear coefficient K [-]	5,211E-03	3,036E-03

Test 4 – alluminio + grafene sonicato 3h

Test 4		Track area [um ²]																							
Duration [cicle]	Duration [m]	Track 1	Track 2	Track 3	Track 4	Track 5	Track 6	Track 7	Track 8	Track 9	Track 10	Track 11	Track 12	Track 13	Track 14	Track 15	Track 16	Track 17	Track 18	Track 19	Track 20	max tot	min tot	Diff %	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1011	30	225	17733	9104	5526	11288	19736	1805	18259	13857	13548	3253	7995	6649	5603	17447	9657	19831	5927	3165	13516	19831	225	98,9	
	Radius	4,7	mm																						

		Wear volume [mm ³]																						
Duration [m]		Track 1	Track 2	Track 3	Track 4	Track 5	Track 6	Track 7	Track 8	Track 9	Track 10	Track 11	Track 12	Track 13	Track 14	Track 15	Track 16	Track 17	Track 18	Track 19	Track 20	Average	St.Dev.	St. Dev. %
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0,0066	0,5237	0,2688	0,1632	0,3333	0,5828	0,0533	0,5392	0,4092	0,4001	0,0961	0,2361	0,1964	0,1655	0,5152	0,2852	0,5856	0,1750	0,0935	0,3991	0,3496	0,1846	52,8	

Test 5 – alluminio + grafene sonicato 3h

Test 5		Track area [um ²]																							
Duration [cicle]	Duration [m]	Track 1	Track 2	Track 3	Track 4	Track 5	Track 6	Track 7	Track 8	Track 9	Track 10	Track 11	Track 12	Track 13	Track 14	Track 15	Track 16	Track 17	Track 18	Track 19	Track 20	max tot	min tot	Diff %	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1909	30	14757	20889	16078	18459	2216	22095	3339	21458	18231	13908	21346	11648	19762	9453	17959	1745	2883	10327	28099	19919	28099	1745	93,8	
	Radius	2,5	mm																						

		Wear volume [mm ³]																						
Duration [m]		Track 1	Track 2	Track 3	Track 4	Track 5	Track 6	Track 7	Track 8	Track 9	Track 10	Track 11	Track 12	Track 13	Track 14	Track 15	Track 16	Track 17	Track 18	Track 19	Track 20	Average	St.Dev.	St. Dev. %
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0,2318	0,3281	0,2526	0,2900	0,0348	0,3471	0,0524	0,3371	0,2864	0,2185	0,3353	0,1830	0,3104	0,1485	0,2821	0,0274	0,0453	0,1622	0,4414	0,3129	0,1627	0,1197	73,6	

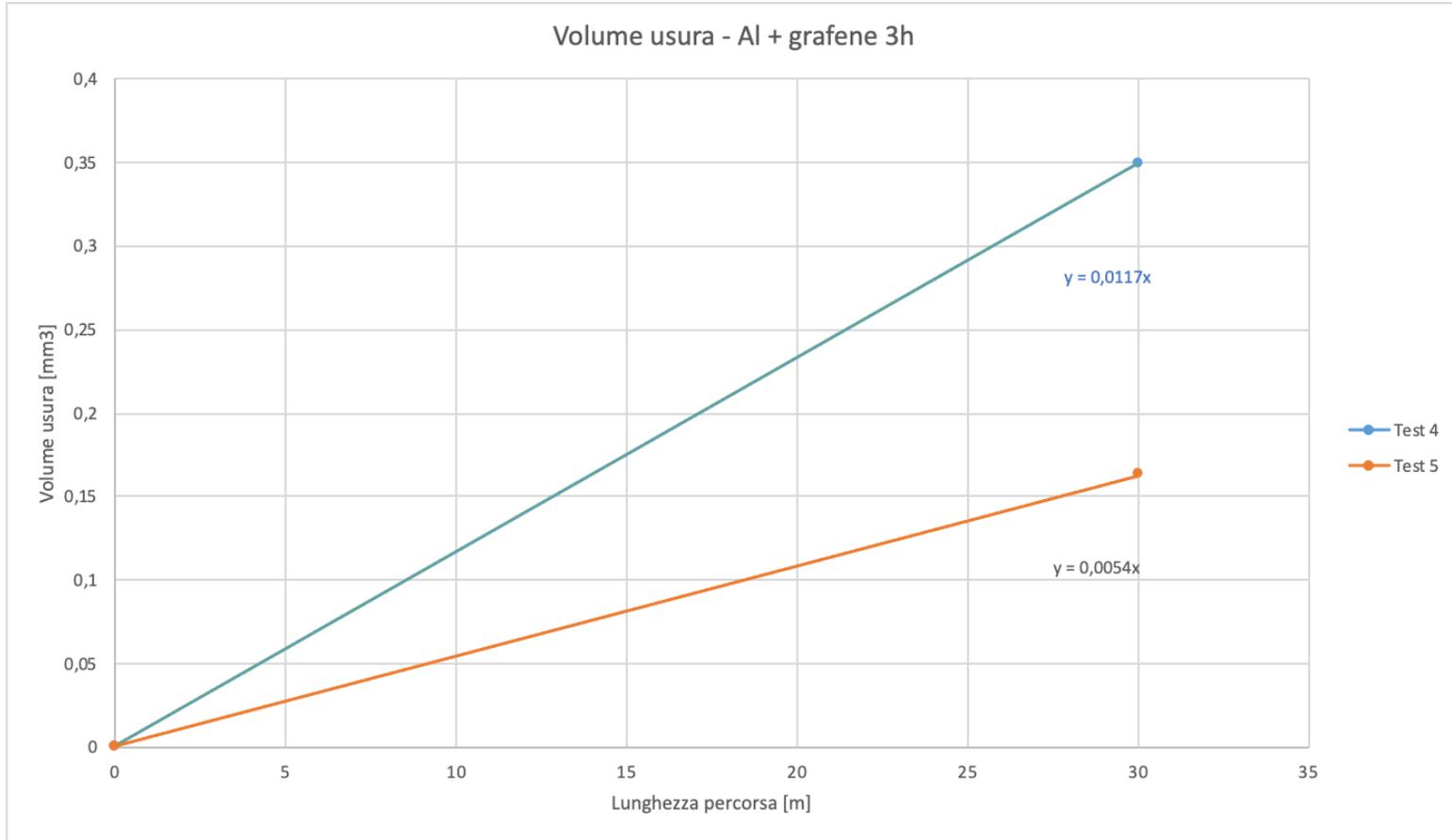


Figura 18. Andamento del volume di usura rispetto alla distanza percorsa per provini in alluminio ricoperti di grafene per test 4 e test 5

Test 6 – alluminio + grafene sonicato 6h

Test 6		Track area [um^2]																						
Duration [cicle]	Duration [m]	Track 1	Track 2	Track 3	Track 4	Track 5	Track 6	Track 7	Track 8	Track 9	Track 10	Track 11	Track 12	Track 13	Track 14	Track 15	Track 16	Track 17	Track 18	Track 19	Track 20	max tot	min tot	Diff%
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1062	30	5397	15870	17000	27717	3968	19078	10267	7293	8237	13480	23317	24424	14066	5556	22848	20587	13339	1658	5192	12866	27717	1658	94,0
	Radius	4,5	mm																					

		Wear volume [mm^3]																						
Duration [m]		Track 1	Track 2	Track 3	Track 4	Track 5	Track 6	Track 7	Track 8	Track 9	Track 10	Track 11	Track 12	Track 13	Track 14	Track 15	Track 16	Track 17	Track 18	Track 19	Track 20	Average	St.Dev.	St. Dev. %
0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30		0,1526	0,4487	0,4807	0,7837	0,1122	0,5394	0,2903	0,2062	0,2329	0,3811	0,6593	0,6906	0,3977	0,1571	0,6460	0,5821	0,3772	0,0469	0,1468	0,3638	0,3848	0,2162	56,2

Test 7 – Alluminio + grafene sonicato 6h

Test 7		Track area [um^2]																						
Duration [cicle]	Duration [m]	Track 1	Track 2	Track 3	Track 4	Track 5	Track 6	Track 7	Track 8	Track 9	Track 10	Track 11	Track 12	Track 13	Track 14	Track 15	Track 16	Track 17	Track 18	Track 19	Track 20	max tot	min tot	Diff%
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2072	30	15125	18867	6729	10606	23271	25272	18867	33869	813,3	3217	18868	6501	21643	19565	5855	17631	20323	13271	13123	16816	33869	813,3	97,6
	Radius	2,3	mm																					

		Wear volume [mm^3]																						
Duration [m]		Track 1	Track 2	Track 3	Track 4	Track 5	Track 6	Track 7	Track 8	Track 9	Track 10	Track 11	Track 12	Track 13	Track 14	Track 15	Track 16	Track 17	Track 18	Track 19	Track 20	Average	St.Dev.	St. Dev. %
0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30		0,2186	0,2727	0,0972	0,1533	0,3363	0,3652	0,2727	0,4895	0,0118	0,0465	0,2727	0,0939	0,3128	0,2827	0,0846	0,2548	0,2937	0,1918	0,1896	0,2430	0,2242	0,1178	52,6

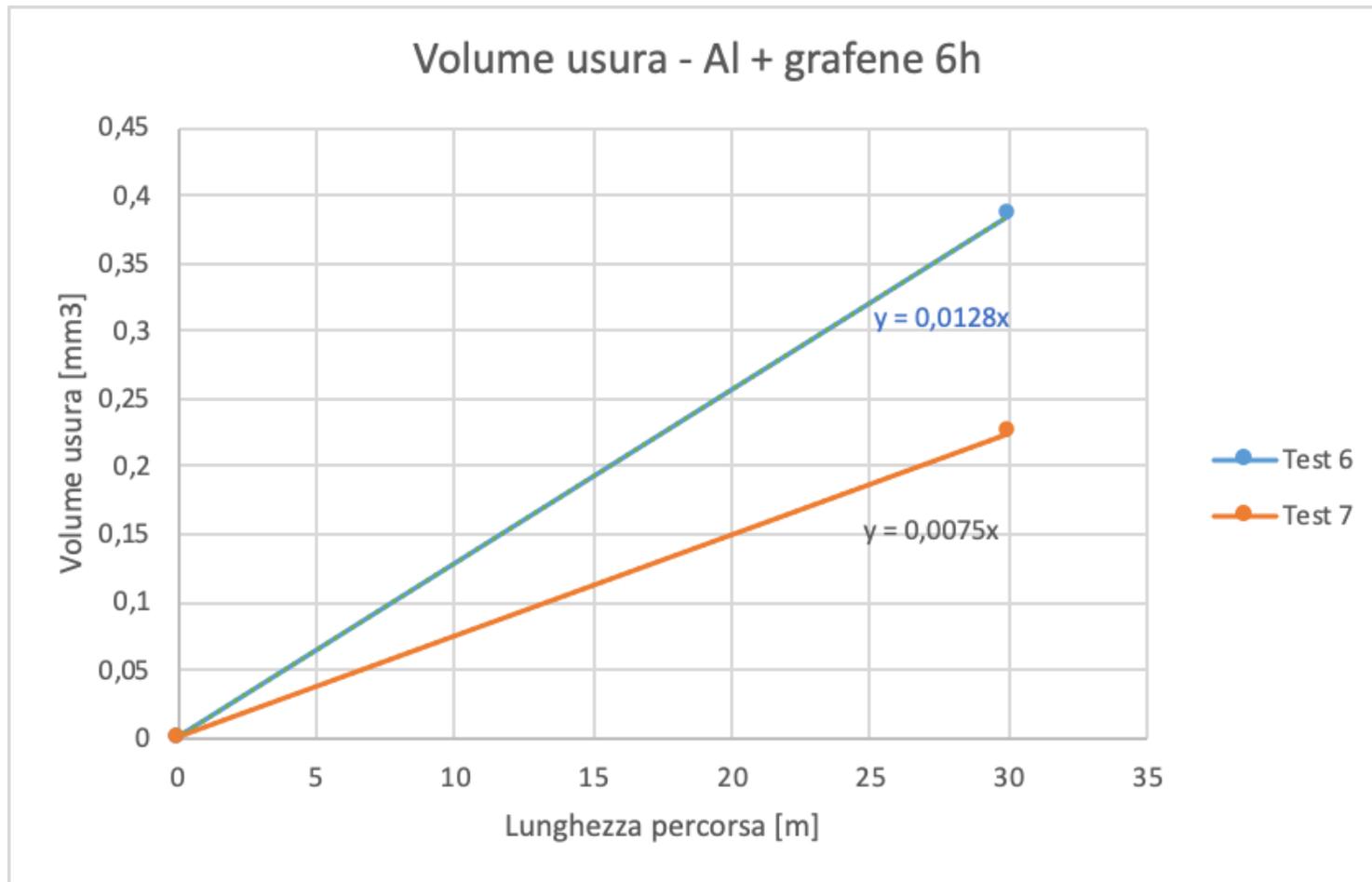


Figura 19. Andamento del volume di usura rispetto alla distanza percorsa per provini in alluminio ricoperti di grafene per test 6 e test 7

Provini in alluminio ricoperti in grafene valutati fino a rimozione di grafene

Dalla valutazione delle prove condotte fino alla rimozione di grafene si nota un coefficiente K di un ordine di grandezza inferiore rispetto a quello ricavato precedentemente. Dal momento che il volume di usura risulta proporzionale a tale coefficiente si deduce che con il ricoprimento di grafene il volume di usura risulterà decisamente ridotto rispetto a prima. Si osserva anche che il ricoprimento in grafene non persiste per molto tempo: ciò lo si può notare dalla

Test 8 – alluminio fino a rimozione grafene 3h

Test end graphene		Track area [μm^2]												max tot	min tot	Diff %
Duration (cicle)	Duration (m)	Track 1	Track 2	Track 3	Track 4	Track 5	Track 6	Track 7	Track 8	Track 9	Track 10	Track 11	Track 12			
		15,8	4,96	15,37	11,88	18,07	12,1	15,28	12,67	13,87	3,81	5,098	13,34	18,07	3,81	78,91533
Raggio	3,6 mm															

Wear volume [mm^3]													Average	St.Dev.	St. Dev. %
Duration (m)	Track 1	Track 2	Track 3	Track 4	Track 5	Track 6	Track 7	Track 8	Track 9	Track 10	Track 11	Track 12			
0,48	0,0003574	0,0001122	0,0003477	0,0002687	0,0004087	0,0002737	0,0003456	0,0002866	0,0003137	8,618E-05	0,0001153	0,0003017	0,000268	0,000106	39,66501

Test 8	
Q/(L*W) [mm^3/mN]	0,00028
Q/(L*W) [m^3/mN]	2,793E-13
H Aluminum [MPa]	812,68
Wear coefficient K	2,270E-04

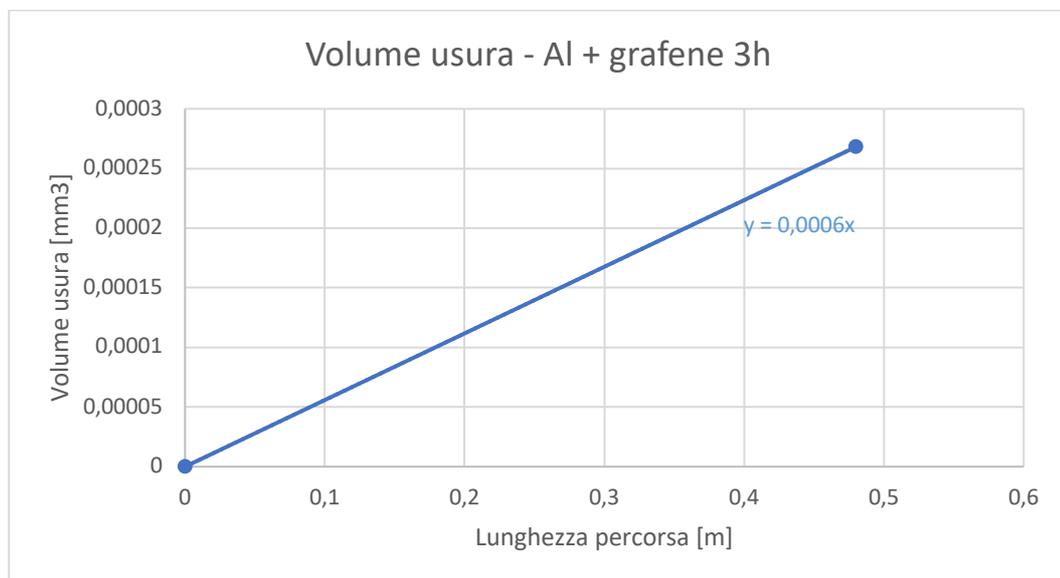


Figura 20. Volume di usura per provini ricoperti in grafene 3h fino a sua rimozione

Test 7 – alluminio fino a rimozione grafene 6h

Test end graphene		Track area [μm^2]														
Duration [cycle]	Duration [m]	Track 1	Track 2	Track 3	Track 4	Track 5	Track 6	Track 7	Track 8	Track 9	Track 10	Track 11	Track 12	max tot	min tot	Diff %
		27,29	25,56	22,85	28,85	19,95	10,25	13,92	22,55	19,36	20,76	21,75	19,18			
Raggio	3,4	mm												28,85	10,25	64,4714

Wear volume [mm^3]															
Duration [m]	Track 1	Track 2	Track 3	Track 4	Track 5	Track 6	Track 7	Track 8	Track 9	Track 10	Track 11	Track 12	Average	St.Dev.	St. Dev. %
1,46	0,000583	0,000546034	0,000488	0,000616	0,000426	0,000219	0,000297	0,000482	0,000414	0,000443	0,000465	0,00041	0,000449	0,000112	24,89178

Test 9	
Q/(L*W) [mm^3/mN]	0,000153801
Q/(L*W) [m^3/mN]	1,53801E-13
H Aluminum [MPa]	812,68
Wear coefficient K	1,25E-04

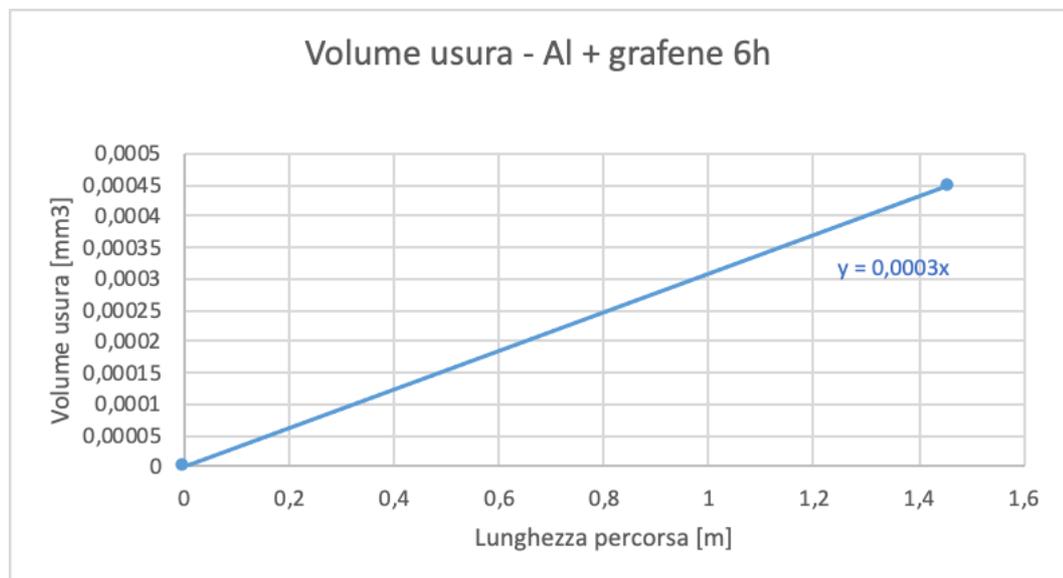


Figura 21. Volume di usura per provini ricoperti in grafene 6h fino a sua rimozione

Sono state infine composte due curve: una per provini in alluminio con ricoprimento in grafene sonicato 3 ore e un'altra con ricoprimento in grafene sonicato 6 ore. Per ogni curva sono presenti due spezzate: il primo segmento, con coefficiente angolare minore, rappresenta l'iniziale ricoprimento di grafene mentre il secondo segmento rappresenta l'andamento del volume di usura in funzione della distanza percorsa per provino in alluminio senza ricoprimento.

Per la composizione dei grafici è stata attuata una approssimazione: infatti, i provini ricoperti in grafene 3h e grafene 6h utilizzati per le prove a cedimento del grafene avevano raggi medi rispettivamente di 3,6 e 3,4 mm mentre uno dei provini non ricoperti presentava raggio 3,5 mm; dal momento però che le prove con ricoprimento avevano dato un valore del volume di usura finale dello stesso ordine di grandezza dei provini non ricoperti (questo a causa della bassa resistenza del grafene) si è costruito un unico grafico che fosse rappresentativo del volume di usura rispetto alla lunghezza percorsa: per basse lunghezze troviamo quindi che il volume di usura è molto basso, il ricoprimento in grafene è quindi presente: superato questo troviamo l'alluminio sottostante e si avrà un maggiore volume di usura. La distanza totale percorsa è di 30 m ma si sono forniti i grafici per distanza di 3 m così da mettere in evidenza i due tratti con materiale diverso.

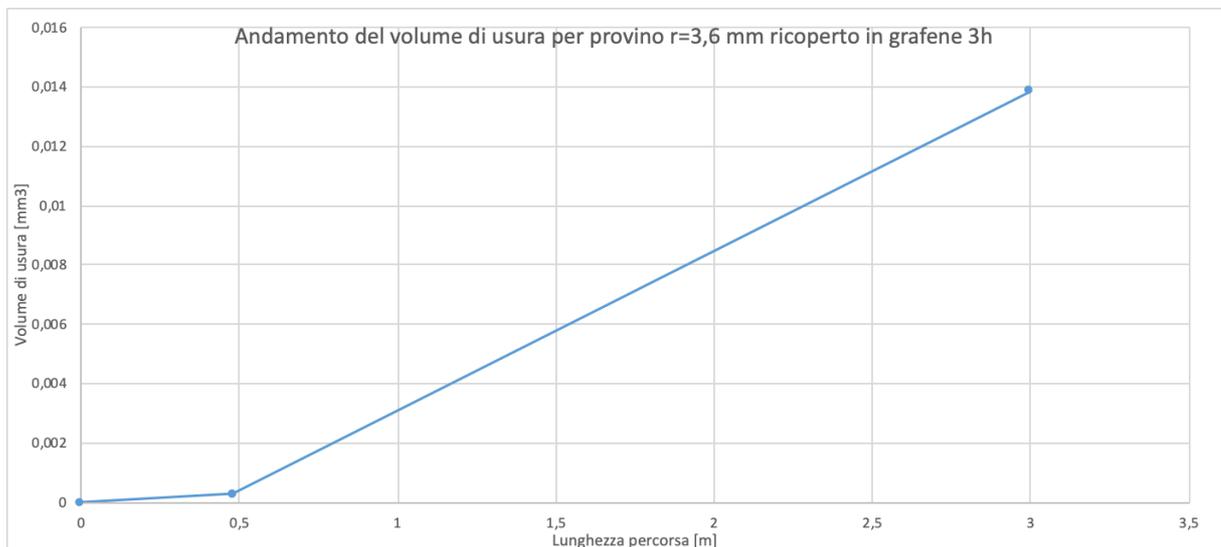


Figura 22. Volume di usura di provino ricoperto in grafene 3h

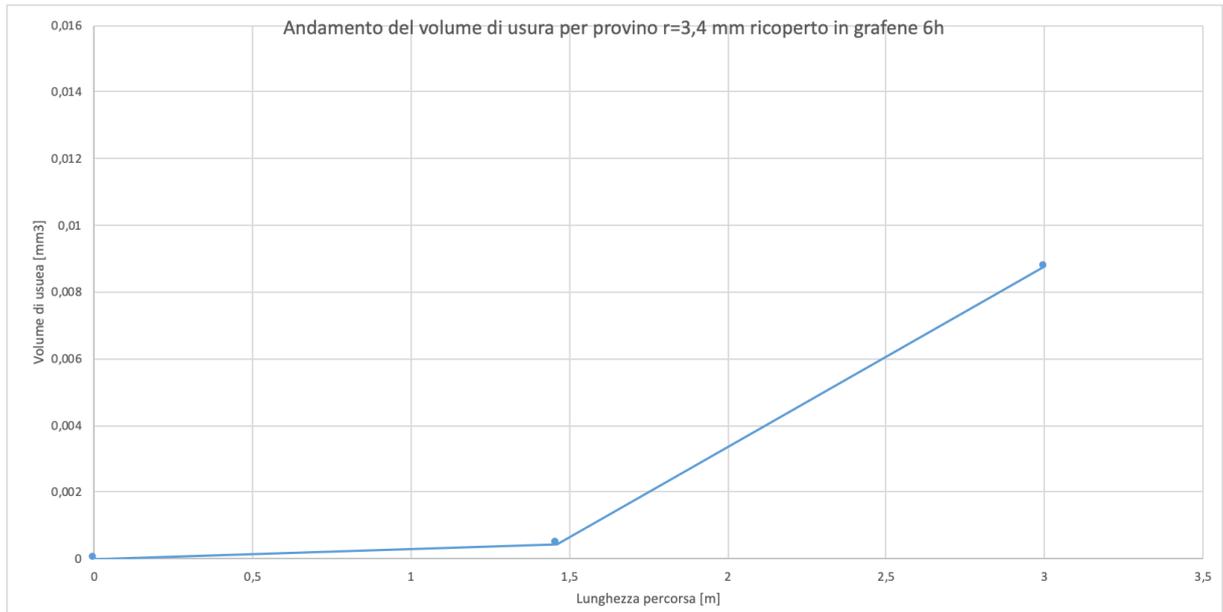


Figura 23. Volume di usura di provino ricoperto in grafene 6h

La sperimentazione sembra suggerire che un ricoprimento a base di grafene sonicato con un maggior numero di ore abbia maggiore durata ma tale ipotesi deve essere validata con più prove sperimentali.

Il primo tratto di ciascuna di queste curve ha coefficiente angolare pari a quello del ricoprimento in grafene, rispettivamente sonicato 3 e 6 ore, il secondo tratto della curva ha coefficiente angolare pari a quello del provino in alluminio non ricoperto.

4. Simulazione prove pin on disc tramite ANSYS®

4.1 Introduzione allo studio tramite elementi finiti

Mentre non è insolito vedere studi di assiemi e complessivi meccanici, anche dal funzionamento complesso, modellati agli elementi finiti, non è altrettanto usuale vedere modellato il fenomeno dell'usura con gli stessi ausili. Esso, infatti, non risulta solo in una perdita di volume nel/nei corpo/i di partenza, ma è il risultato di una serie di interazioni tra corpi, reazioni chimiche – basti pensare all'effetto che può avere un ricoprimento su una superficie che viene a reagire con il materiale a contatto-, calore da attrito, detriti, tutte caratteristiche dei processi tribologici. Un modello che tenga conto almeno di alcuni degli aspetti elencati servirebbe ai ricercatori per validare le prove tribologiche ottenute in laboratorio.

I meccanismi che portano all'usura sono così variegati che ottenere una netta distinzione in categorie sarebbe inverosimile; tuttavia, possiamo riconoscere l'esistenza di tre meccanismi principali:

- L'usura adesiva: a causa dello strisciamento tra due corpi si determina un danneggiamento e il risultato è l'adesione dei due corpi;
- L'usura abrasiva: il contatto tra un corpo più duro con uno caratterizzato da minore durezza porta al danneggiamento di quest'ultimo corpo, causando asportazione di materiale. E' questo il caso che viene trattato in questo studio.
- L'usura per fatica (fretting): consiste nello scorrimento di parti di materiale per numerosi cicli, causando deterioramento.

4.2 Le variabili che influenzano l'usura

I sistemi tribologici sono affetti da numerose cause, dalle proprietà dei materiali alle condizioni operative. Le variabili che influenzano attrito e usura sono molteplici ed esse diventano più o meno importanti nello studio al variare delle reciproche condizioni di scorrimento.

Alcuni elementi chiave per lo studio dell'usura:

- l'area reale di contatto, rappresentata da una serie di microcontatti, raffigurati in Fig.24. Non è quindi l'area nominale.

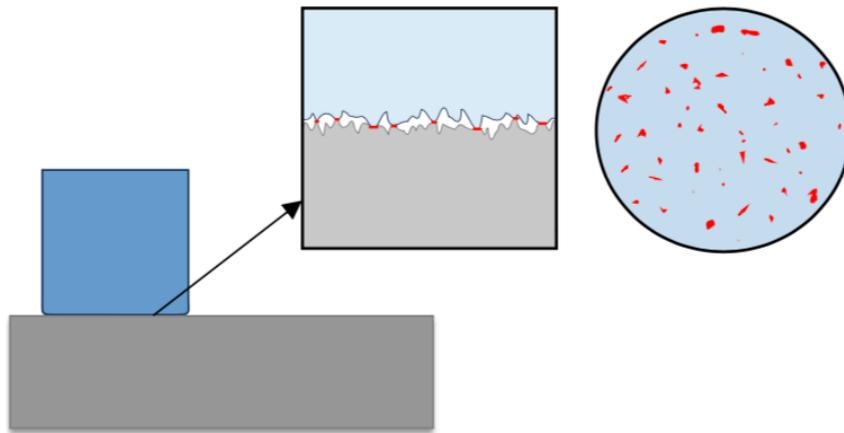


Figura 24. Rappresentazione area reale di contatto

- il carico P: l'area di contatto A_r cresce con l'aumentare del carico P , come dimostra la relazione di Hertz:

$$A_r \propto P^{2/3}$$

La ragione per cui non è presente una proporzionalità diretta è il fatto che con l'aumento dei carichi risulti un aumento dello stress ma non del numero di punti di contatto tra i due corpi, evidenziati in rosso in Fig.1.

- la velocità di scorrimento: sperimentalmente si è verificato che a bassi regimi di velocità essa non influenza l'usura mentre, superata una certa soglia, diventa un parametro da tenere in considerazione: essa infatti, grazie alla fusione delle asperità presenti nella superficie, porta ad una diminuzione del coefficiente di attrito e , di conseguenza, dell'usura.
- la temperatura: all'aumentare della velocità di scorrimento si assiste ad un aumento della temperatura. Ciò non è importante nelle analisi relative ai metalli in generale se non si superano i 150°C . Oltrepassata questa soglia si può assistere a un mutamento delle proprietà intrinseche del materiale, quali, ad esempio, diminuzione della durezza. Essendo una variabile molto importante nei polimeri, i quali cambiano repentinamente proprietà anche al di sotto dei 150°C , ma non dei metalli, essa non verrà tenuta in conto per le analisi presentate.

4.3 Il modello dell'usura di Archard

Un modo semplice per la verifica del volume asportato a causa dell'usura è l'utilizzo di una formula sviluppata da Holm e Archard, nota comunemente come "Legge di Archard". La sua semplicità di applicazione ha reso questa relazione matematica molto conosciuta in ambito tribologico, la si riporta in seguito:

$$Q = \frac{kWL}{H}$$

Dove:

Q=volume asportato per usura [m³];

k=coefficiente adimensionale ricavato dalla sperimentazione;

W=carico applicato [N];

L=lunghezza del contatto [m];

H=durezza del materiale oggetto di studio [Pa];

Classification	Wear Mechanisms	Wear coefficient K (range)
Wear dominated by mechanical behavior of materials	<ol style="list-style-type: none"> 1. Asperity deformation and removal 2. Wear caused by plowing 3. Delamination wear 4. Adhesive wear 5. Abrasive wear 6. Fretting wear 7. Wear by solid particle impingement 	<ol style="list-style-type: none"> 10⁻⁴ 10⁻⁴ 10⁻⁴ 10⁻⁴ 10⁻² to 10⁻¹ 10⁻⁶ to 10⁻⁴ -
Wear dominated by chemical behavior of Materials	<ol style="list-style-type: none"> 1. Solution wear 2. Oxidation wear 3. Diffusion wear 4. Wear by melting of the surface layer 5. Adhesive wear at high temperatures 	

Figura 25. Tabella dei valori del coefficiente adimensionale k

E' importante sottolineare come il coefficiente k provenga, di fatto, dalla sperimentazione. Esso varierà in funzione dei materiali a contatto; risulta quindi importante, ai fini di effettuare

simulazioni in ambiente a elementi finiti, premunirsi di esperimenti e prove condotte precedentemente con i materiali oggetto di studio.

4.4 Il calcolo di Ansys

Su scala continua, l'usura è approssimata da modelli fenomenologici che mettano in relazione differenti quantità sulla superficie di contatto con l'asportazione di materiale. La perdita di materiale per usura è approssimata riposizionando i nodi di contatto sulla superficie di contatto, determinando le nuove coordinate dei nodi con i modelli di usura. Dal momento che le posizioni dei nodi, cambiano le variabili di contatto, come la pressione, le posizioni dei nodi mutano e l'equilibrio può essere perso; per questa ragione il programma itera fino a trovare una nuova posizione di equilibrio.

Ansys opera calcolando la profondità di usura q e, da lì, calcola il corrispettivo volume di usura.

Dalla legge di Archard: $\frac{Q}{L} = \frac{KW}{H}$ si dividono entrambi i membri per l'area di contatto ottenendo $\frac{q}{L} = \frac{kp}{H}$ dove h è la profondità di usura e p è la pressione di contatto, ottenuta come rapporto tra il carico e l'area di contatto considerata.

In particolare, poiché il dato di input considerato in questa analisi è la velocità di rotazione del disco, si esplicita la lunghezza percorsa L come il prodotto della velocità v e del tempo t , ottenendo:

$$q = \frac{kp v}{H} t$$

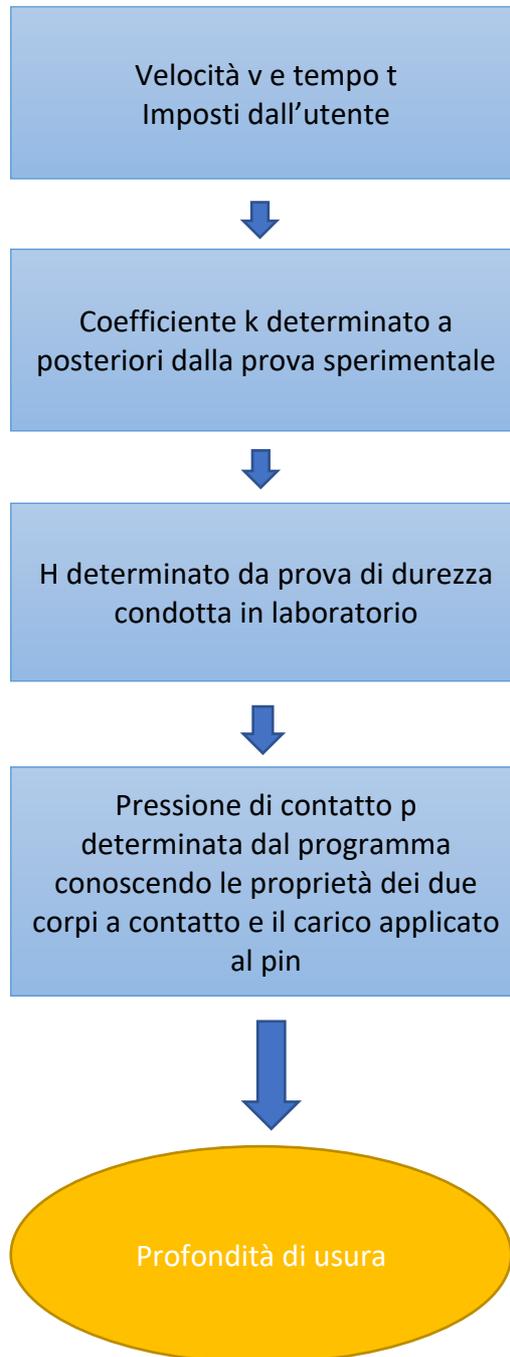
La legge usata da Ansys per calcolare la profondità di usura è:

$$q = \frac{kp^a v^b}{H} t$$

Si nota che compaiono due coefficienti, a e b , denominati rispettivamente coefficiente di pressione e coefficiente di velocità; tali coefficienti sono impostati dall'utente per calibrare il proprio modello.

Tali coefficienti non determinabili a priori, per cui per determinare il loro valore è stato eseguito un processo iterativo, al fine di ottenere un volume di usura e una pressione del pin sul disco dell'ordine di grandezza di quello della sperimentazione.

Il coefficiente k viene ricavato tramite le prove sperimentali in cui viene riprodotto il fenomeno simulato mentre il valore di H è stimato tramite prova di durezza in laboratorio.



4.5 Caso di studio: pin on disc. Costruzione del modello

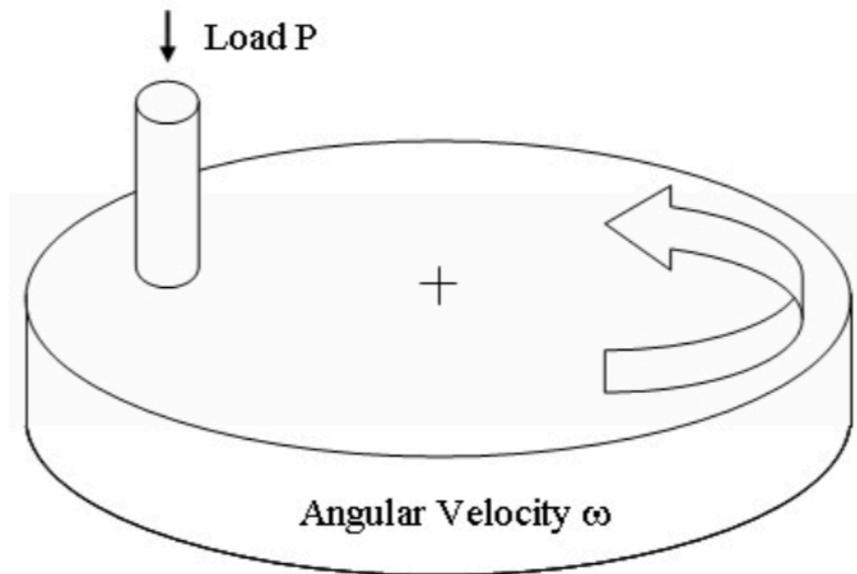


Figura 26. Prova pin on disc

Oggetto di questo studio è l'analisi pin on disc. Attraverso un tribometro, uno strumento che è stato presentato nel capitolo dedicato alla parte sperimentale, viene applicato un carico P di 2 N.

Si è simulato in ambiente ANSYS Workbench il processo di usura del caso pin on disc, con riferimento all'usura del solo disco, che è quella che è stata analizzata nelle prove sperimentali. Dal momento che ANSYS non dispone di un tool dedicato all'usura, si sono dovuti integrare all'ambiente Workbench, con interfaccia grafica, i comandi APDL per ricreare la condizione desiderata.

Si è dapprima costruito il modello su SolidWorks e, dopo averlo salvato in formato .IGS, ovvero un formato leggibile da Ansys, lo si è integrato in ambiente Ansys Workbench.

In ambiente Ansys si è andati a impostare il sistema di riferimento scelto: esso risulta il sistema “Metric” indicato con la spunta in Fig 27. Tale scelta è importante poiché le grandezze che si andranno successivamente a immettere come comandi APDL devono seguire tali unità di misura.

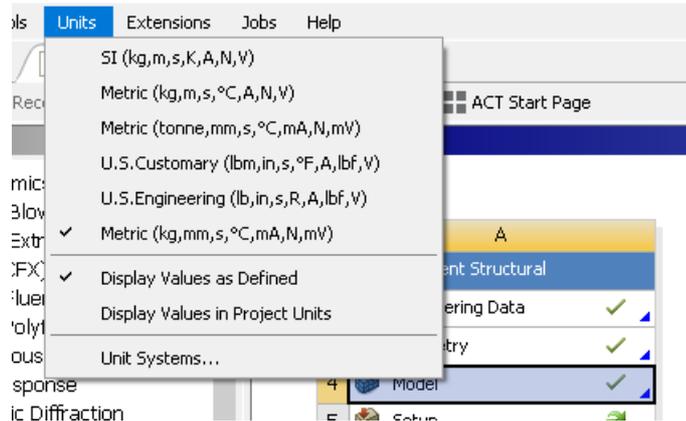


Figura 27. Il sistema di riferimento scelto

Si è dapprima creato il modello in ambiente Solidworks, costituito dal pin a estremità emisferica e dal disco, qui raffigurato come un anello allo scopo di non andare ad appesantire la mesh del programma con parti che non andavano ad interessare la simulazione.

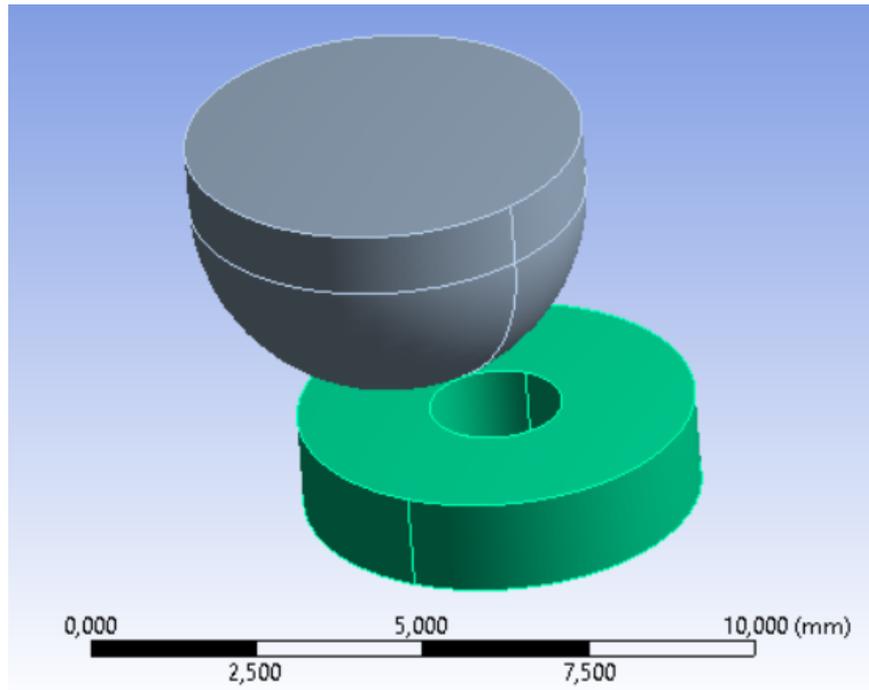


Figura 28. Rappresentazione di disc e pin

L'anello risulta essere di alluminio mentre il pin è in acciaio 100Cr6. Vengono quindi riportate le proprietà impiegate da Ansys per definire i due materiali di studio.

Le caratteristiche della lega di alluminio sono state prese dalla libreria predefinita del programma Ansys.

Modulo di Young [GPa] [1]	210
Modulo di Poisson [2]	0,3
Modulo di Bulk [GPa] [3]	140
Densità [kg/m ³] [4]	7800
Massima resistenza a trazione [MPa] [5]	1400
Resistenza allo snervamento [MPa] [6]	835
Modulo di taglio [GPa] [7]	80

Figura 29. Caratteristiche acciaio 100Cr6

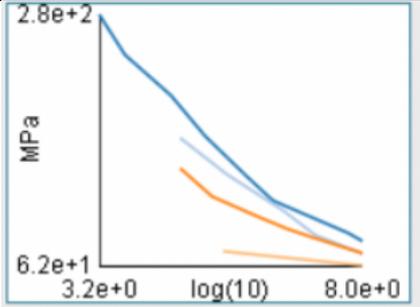
Modulo di Young [GPa] [8]	71
Modulo di Poisson	0,33
Modulo di Bulk [GPa]	69,6
Modulo di taglio [Gpa]	26,7
Coefficiente isotropico di espansione termica [1/°C]	2,3e-05
Massima resistenza a compressione [MPa]	0
Resistenza a snervamento a compressione [MPa]	288
Massima resistenza a trazione [MPa]	310
Resistenza a snervamento a trazione [MPa]	280
Curva S-N	

Figura 30. Caratteristiche lega di alluminio

La scelta dell'acciaio 100Cr6, materiale usualmente impiegato per le sfere dei cuscinetti a rotolamento, per il pin è spiegata dal fatto che esso è un materiale estremamente resistente all'usura adesiva e abrasiva e poiché resiste bene a fatica. Ciò è in linea con quanto si intende simulare: infatti si suppone che solamente il disco sia sottoposto a usura mentre il pin non risente del fenomeno.

Una volta definita la geometria e assegnati i materiali ai due oggetti in esame si è definito il mutuo contatto come contatto "Frictional disc to pin" e si è andati a definire quelli che il software denomina "Contact bodies" e "Target bodies". Il corpo più soggetto ad usura o su cui si vuole studiare l'usura viene denominato "Contact Body" (parte rossa) mentre la parte non soggetta ad usura risulta la parte blu, ovvero il "Target Body".

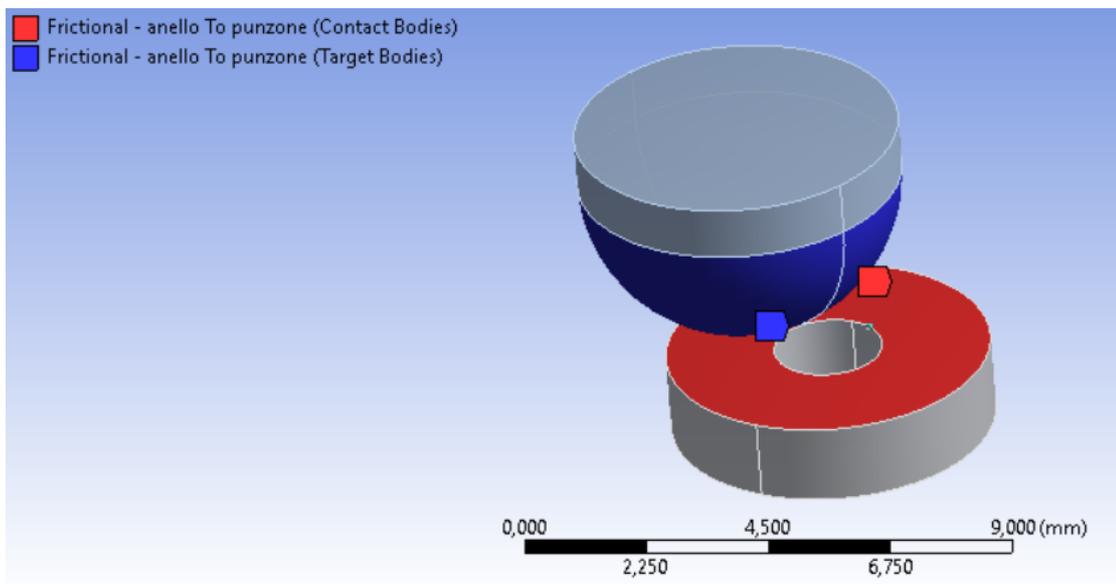


Figura 31. "Contact Body" e "Target Body"

Nella sezione di Ansys dedicata alla descrizione del comando “Frictional disc to pin” si è andati ad immettere i comandi APDL per simulare correttamente il fenomeno dell’usura. Ansys, infatti, non dispone di un tool per simulare l’usura ma richiede che l’utente immetta i comandi APDL a mano, integrandoli quindi all’ambiente Workbench.

```
12 K=0.001178
13 H=812.38
14 m=0.6
15 n=0.1
16 !
17 TB,WEAR,cid,,,ARCD
18 TBCDATA,1,K,H,m,n
19 !|
```

Figura 32. Comandi APDL per usura

Il programma richiede l’immissione di 4 costanti denominate C1, C2, C3 e C4 che corrispondono rispettivamente al coefficiente di usura adimensionale K – determinato tramite le prove sperimentali -, la durezza H in MPa, e i coefficienti di pressione e velocità m ed n.

Si noti come, in questo caso, risulti importante e fondamentale la scelta iniziale del sistema di riferimento ovvero Metric (kg, mm, s, °C, mA, N, mV): per tale motivo si è potuta esprimere la durezza in N/mm^2 ovvero MPa avendo nel proprio sistema di riferimento unità come i mm e i N.

Si attribuito al disco un “Revolute Joint”, per attuare la rotazione del disco intorno al suo asse.

Il contatto tra i due corpi presenta attrito e per questo motivo come coefficiente di attrito per la superficie del disco si è inserito il coefficiente di attrito medio ricavato dalle prove in laboratorio eseguite con il tribometro.

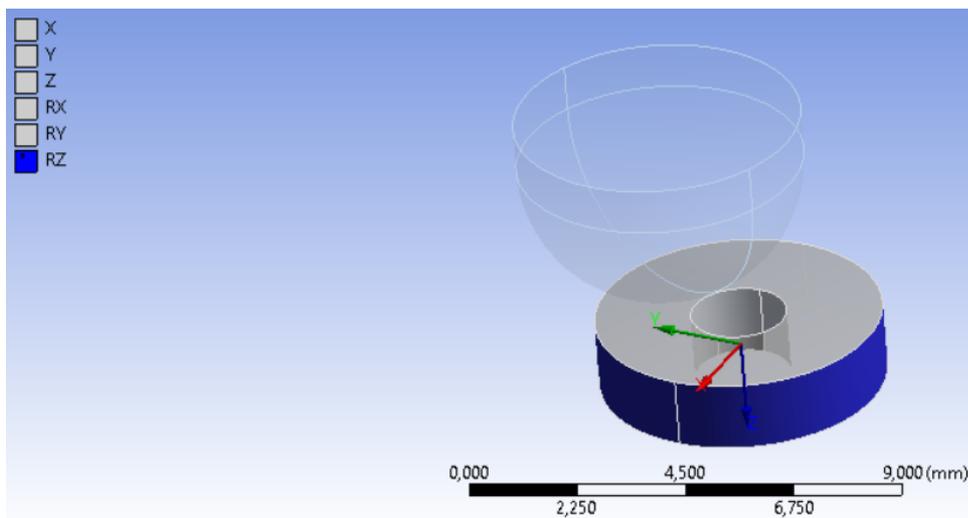


Figura 33. Comando “Revolute Joint”

Si noti che “Revolute joint” richiede l’asse z attorno al quale ruotare per cui, tramite il sistema locale di coordinate, si è andati a spostare l’asse z, in figura mostrato verticale.

Successivamente si è imposto uno spostamento del corpo semisfera sul disco, ottenuto tramite il modulo di Poisson dei due materiali, il modulo elastico, il carico applicato (2 N) e l’applicazione della relativa teoria di Hertz. Si noti come questa possa essere infatti una condizione al contorno insolita, ci si aspetterebbe una forza imposta al posto di uno spostamento, ma si è applicato ciò poiché con la forza si potrebbero generare più facilmente problemi di convergenza e i tempi di simulazione si allungerebbero.

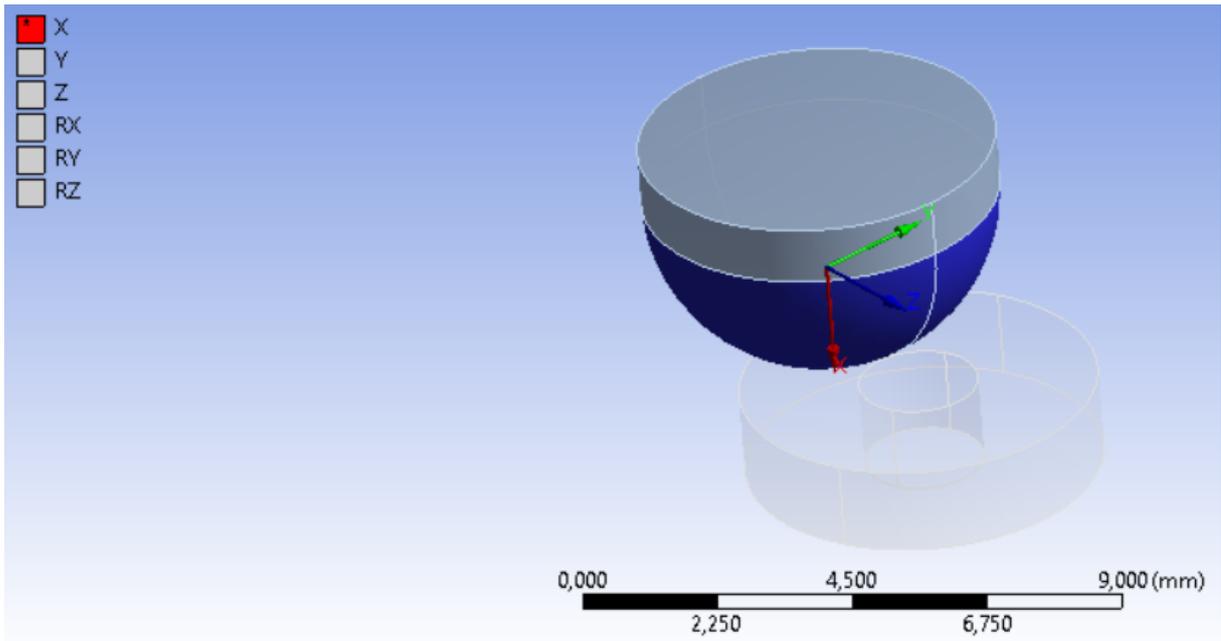


Figura 34. Comando “Joint displacement”

Si noti anche come lo spostamento sia richiesto lungo x quindi, agendo sul sistema locale di coordinate, si è andati a posizionare l’asse x verso il basso.

Tramite l’operazione di “face sizing” si è andati a creare la mesh per l’anello e la parte emisferica del pin.

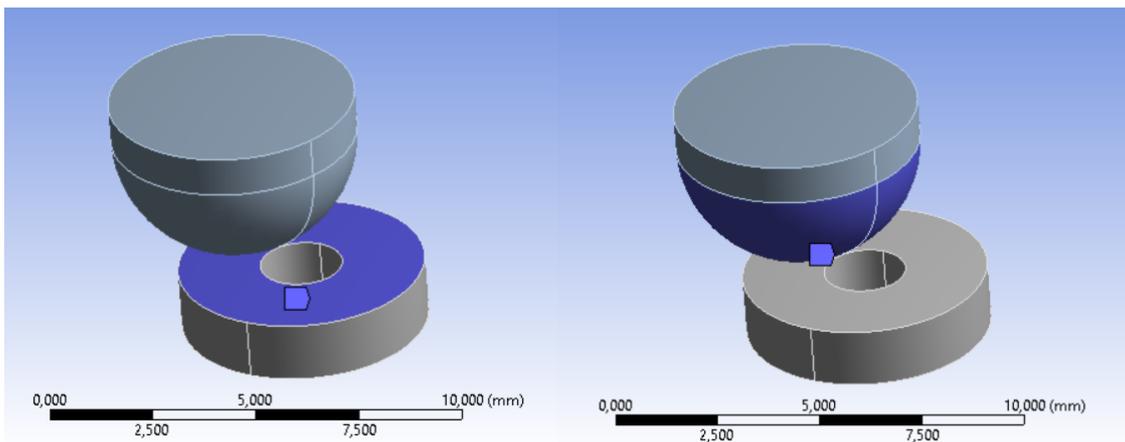


Figura 35. Zone di contatto dei due corpi

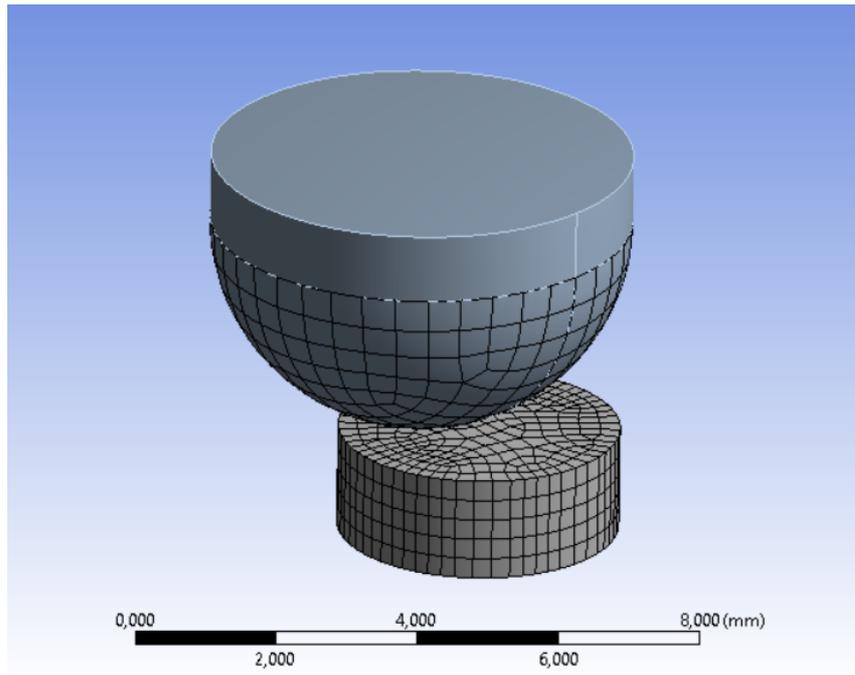


Figura 36. Rappresentazione della mesh per $r=1$ mm

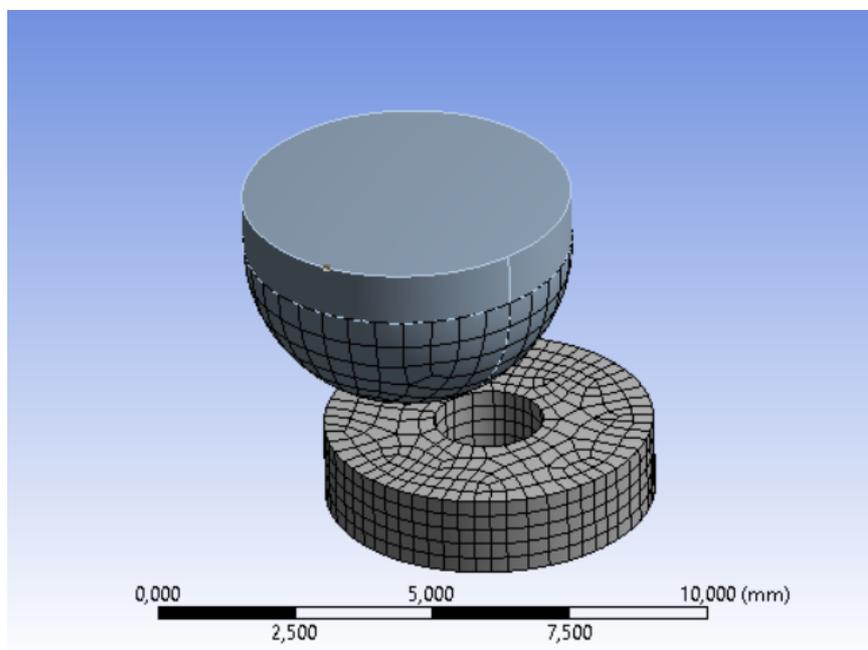


Figura 37. Rappresentazione della mesh per $r=3,5$ mm

Si noti come il pin sembri, all'apparenza non interamente meshato. Ciò non risulta vero: infatti, nel modello Solidworks, esso è stato costruito come l'insieme di due parti, la parte emisferica e la parte cilindrica; Ansys interpreta quindi il pin come l'insieme di due parti e sottopone a mesh solo la parte a contatto con il disco, che risulta essere quella grazie alla quale il disco si usura. Non è stata quindi aggiunta volontariamente la mesh nella parte cilindrica del pin per questa ragione.

Details of "Mesh"	
Display	
Display Style	Use Geometry Setting
Defaults	
Sizing	
Use Adaptive Sizing	Yes
Resolution	Default (2)
Mesh Defeaturing	Yes
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Initial Size Seed	Assembly
Bounding Box Diagonal	10,137 mm
Average Surface Area	16,373 mm ²
Minimum Edge Length	0,3927 mm
Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Aggressive Mechanical
<input type="checkbox"/> Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	None

Figura 38. Caratteristiche della mesh

E' stata creata la mesh per il pin e il disco. E' stata creata una mesh non finissima poiché la licenza studenti di Ansys non permette la creazione di più di 32000 nodi. Dalla statistica dei nodi sulla mesh di un elemento, ovvero l'anello, si osserva che i nodi totali sono 6859; supponendo che anche il pin abbia ugual numero di nodi si sta ampiamente dentro il limite dei 32000 nodi; la mesh non è stata ulteriormente raffinata poiché Ansys interpreta come nodi non solo i nodi in senso stretto, ovvero gli elementi che delimitano i lati, ma assegna in maniera

arbitraria anche un certo numero di nodi per le condizioni al contorno, nel nostro caso uno spostamento imposto. Sono stati utilizzati per la mesh elementi con tre e quattro lati.

Details of "Face Sizing" - Sizing	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	Default (0,65388 mm)
Advanced	
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default
Influence Volume	No
Behavior	Soft

Figura 39. La funzione "Face Sizing"

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	6859
<input type="checkbox"/> Elements	1491

Figura 40. Statistica sulla mesh

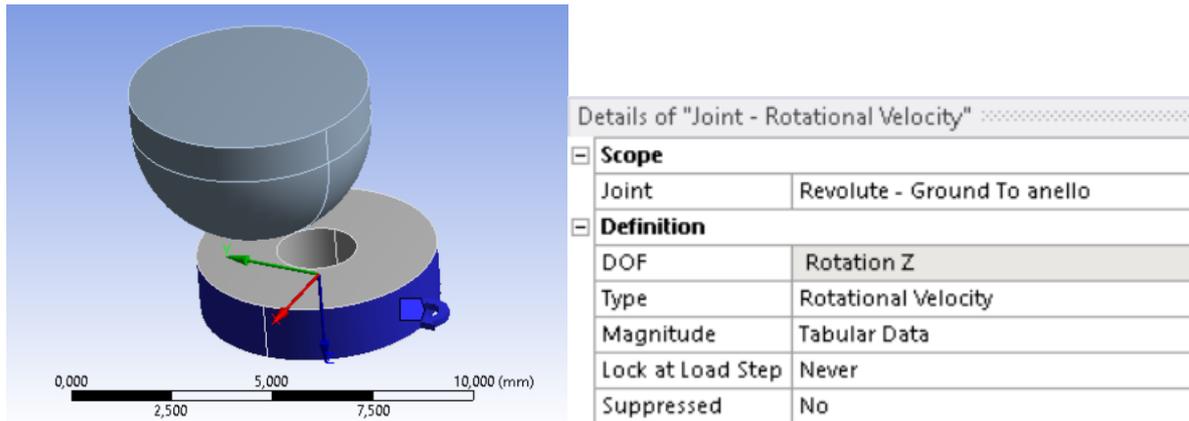


Figura 41. “Rotational velocity” tramite cui si assegna velocità di rotazione al disco

All’elemento anello è stata applicata una velocità angolare in rad/s, dipendente dal raggio medio del disco, essendo la velocità lineare di 1,5 cm/s, sempre prestando attenzione a posizionare l’asse z verso il basso come richiesto dal programma, che indica infatti come dof (grado di libertà) tale asse.

Raggio medio [mm]	Velocità lineare [m/s]	Velocità angolare [rad/s]
1	1,5	15
2	1,5	7,5
3,5	1,5	4,3

E’ importante sottolineare che la velocità angolare non va applicata dal primo secondo di simulazione ma è consigliabile applicarla un secondo dopo o una frazione di secondo dopo l’inizio della simulazione. Questo accade poiché il programma interpreta tale velocità imposta come qualcosa di troppo repentino e impulsivo; in altri termini, il programma restituisce un errore. Stessa cosa è da applicare allo spostamento imposto, che è stato calcolato tramite il contatto hertziano.

Si esamina il caso di studio, in questo caso noi avremo a che fare con un caso “sphere on flat plane” ovvero sfera, costituita dalla estremità del pin, e traccia di usura, si inseriscono i dati e

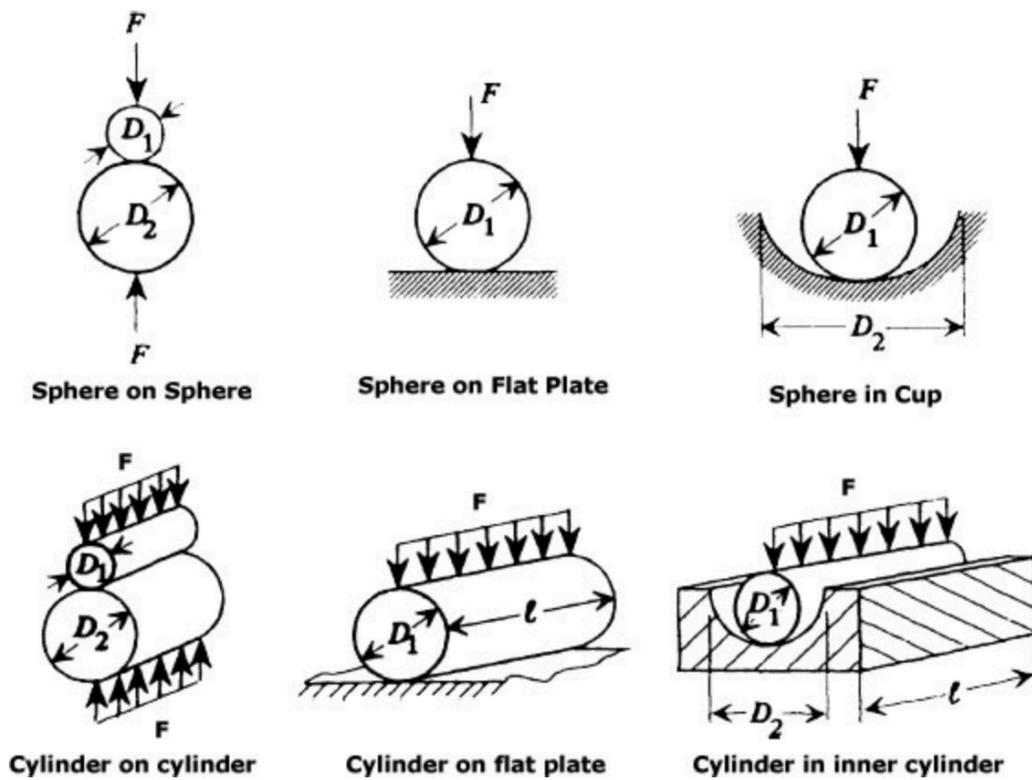


Figura 42. Contatti hertziani

	Sfera	Piano
Modulo Poisson	0,3	0,33
Modulo elastico [GPa]	210	71
Diametro [mm]	6	
Forza [N]	2	



Pressione massima [MPa]	522,3	
τ_{max} [MPa]	165	161,4
Massima profondità di penetrazione [mm]	0,02	0,021
Diametro area contatto [mm]	0,085	

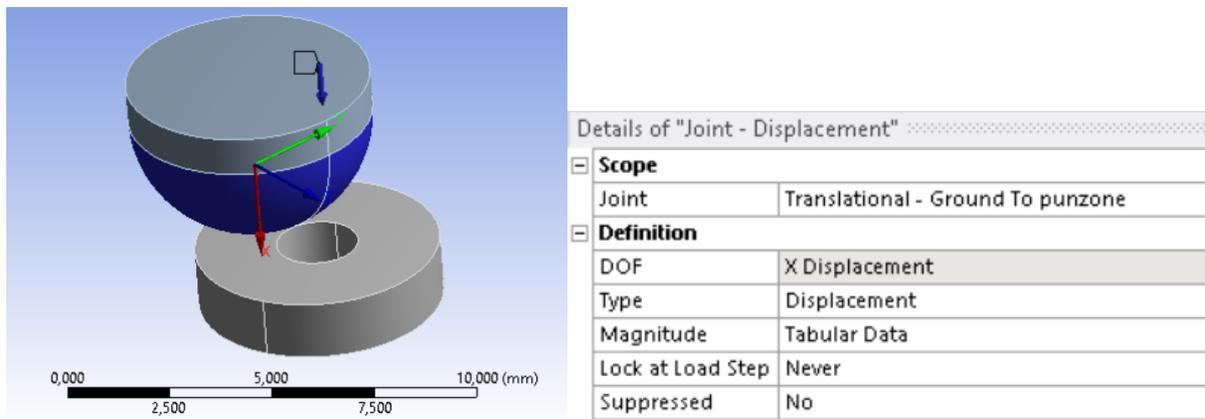


Figura 43. Comando “Joint displacement”

Sono stati impostati gli elementi in “Analysis settings”, ovvero tempo di simulazione, step da applicare, e dettagli riguardanti la analisi.

Infine sono stati inseriti nel comparto “soluzione” le informazioni riguardanti il volume di usura (inserito manualmente poiché Ansys non contempla il calcolo del volume di usura con un tool dedicato per cui si è impostato il problema con codice APDL integrato all’ambiente Workbench presentato), lo stress equivalente secondo l’ipotesi di Von Mises, il Contact tool, uno strumento di Ansys che permette il calcolo di pressione e stato finale dell’oggetto di studio, la forza di reazione normale e la profondità di usura, denominata da Ansys “wear thickness” e inserita in soluzione tramite “user defined result”.

Details of "Analysis Settings"	
Step Controls	
Number Of Steps	10,
Current Step Number	3,
Step End Time	3, s
Auto Time Stepping	On
Define By	Time
Carry Over Time Step	Off
Initial Time Step	1,e-003 s
Minimum Time Step	1,e-003 s
Maximum Time Step	0,3 s
Time Integration	On
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Off
Large Deflection	On
App. Based Settings	Moderate Speed Dynamics

Figura 44. Analysis Settings: impostazioni

Il tempo di simulazione è stato impostato di soli 10 secondi. Questo perché anche solo 10 secondi richiedono un tempo di simulazione molto alto (circa 4 ore). La durata della prova sperimentale, invece, risulta essere di 30 minuti. Dal momento però che la legge di Archard è una legge lineare, viene estrapolato il volume di usura alla corrispondente durata di 10 secondi e lo si confronta con quello della simulazione.

Ansys, quindi, interpreta e suddivide il tempo totale di simulazione, ovvero 10 secondi, in 10 step da un secondo ciascuno e per ogni step imposta un tempo massimo di avanzamento (Maximum Time Step) per ottenere la convergenza della soluzione.

4.6 Costruzione dello strato di grafene

L'obiettivo cardine del lavoro è comparare il volume d'usura dei provini senza ricoprimento con quelli ricoperti di un sottile strato di grafene dell'ordine dei nm. Il grafene è un materiale molto particolare poiché è un materiale 1D, ovvero è composto da uno strato monoatomico. Più comunemente si sente parlare anche di grafene nel caso siano presenti più strati monoatomici, dell'ordine appunto dei nanometri, anche se più strati di grafene di consistente spessore costituiscono la grafite; questo accade poiché anche la replica in laboratorio di un materiale con spessore così infinitesimo è difficile e complessa e si riesce invece più agevolmente replicare uno strato ben definito.

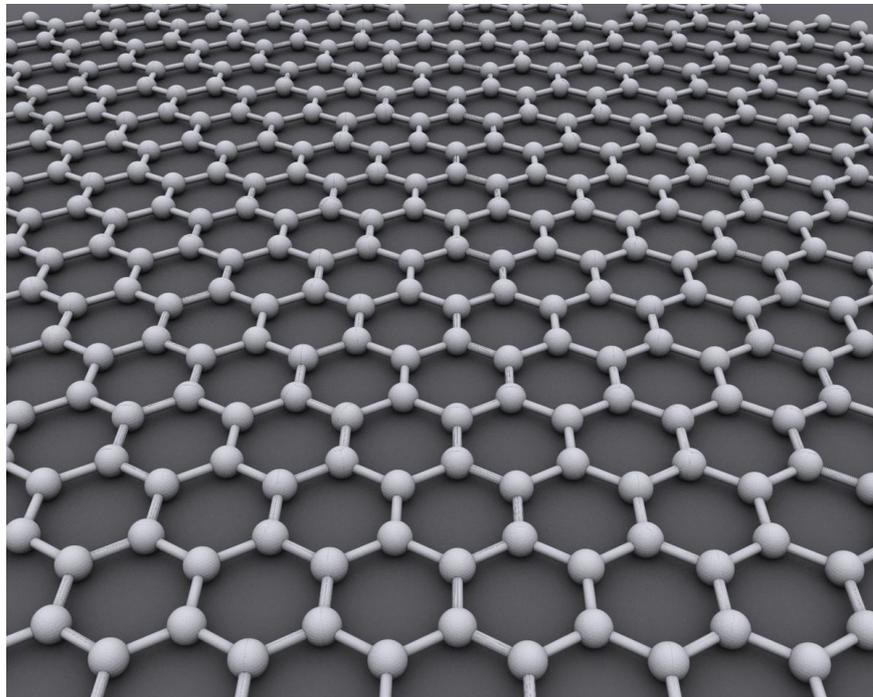


Figura 45. Rappresentazione grafica del grafene

In Ansys, quindi, è trattato come materiale 3D e non come materiale 1D ed è stato inserito nella libreria del programma come nuovo materiale con le seguenti proprietà ricavate dalla letteratura.

Proprietà	Valore
Modulo di Young [TPa] [9]	1
Densità [2.2 g/cm ³] [10]	2,2
Modulo di Poisson [11]	0,22
Modulo di Bulk [GPa] [12]	130
Modulo di taglio [GPa] [13]	370
Carico di rottura [GPa] [14]	130

Nella tabella si è riportata la densità della grafite al posto di quella superficiale del grafene poiché si è trattato il grafene come materiale 3D.

Sono stati considerati due provini ricoperti per valutare il volume di usura di grafene a cedimento; un provino in alluminio, con raggio medio 3,6 mm, ricoperto in grafene sonicato 3 ore e un provino a raggio medio 3,4 mm sonicato 6 ore.

Come per il caso dei provini in solo alluminio, il disco è stato fatto ruotare a 1,5 cm/s. In tabella si riporta la corrispondente velocità in rad/s imposta al programma.

Raggio medio [mm]	Velocità lineare [m/s]	Velocità angolare [rad/s]
3,6	1,5	4,16
3,4	1,5	4,41

La forza applicata al pin risulta essere sempre di 2 N e ciò si traduce, come nel caso dei provini in solo alluminio, in una condizione di penetrazione del pin sul disco, data come condizione al contorno, ricavabile con la teoria di Hertz conoscendo i moduli di Poisson e di Young dei materiali, il diametro del pin e la forza applicata.

	Sfera	Piano
Modulo Poisson	0,3	0,41
Modulo elastico [GPa]	210	1000
Diametro [mm]	6	
Forza [N]	2	



Pressione massima [MPa]	1172,5	
τ_{max} [MPa]	363,5	334,7
Massima profondità di penetrazione [mm]	0,014	0,015
Diametro area contatto [mm]	0,057	

Relativamente alla legge di Archard si è adottato un modello con durezza del materiale dello strato sottostante: così facendo si assume che lo strato superficiale sia talmente piccolo da far sì che prevalga la durezza del materiale sottostante dato lo spessore infinitesimo del grafene.

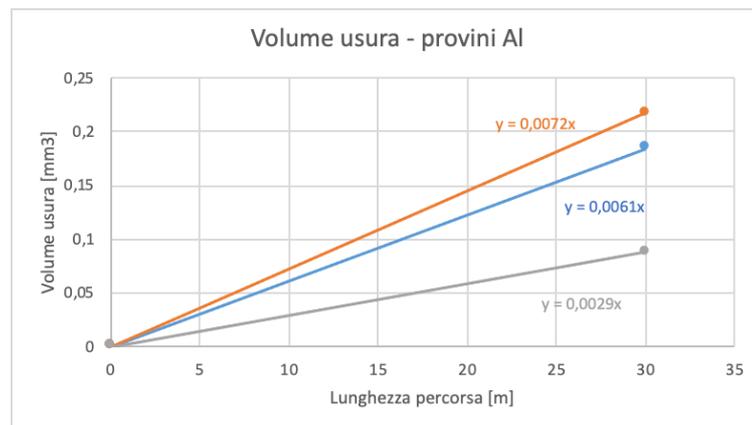
5. Confronto dati sperimentali e simulati

L'obiettivo è quello di vedere se il volume di usura simulato tramite software sia comparabile con quello ottenuto tramite prova sperimentale.

Poiché la prova sperimentale è stata ottenuta facendo fare al pin un percorso di 30 m e tale distanza era poco realisticamente simulabile tramite Ansys a causa di lunghi tempi di simulazione si è utilizzata una tecnica di estrapolazione.

Avendo il grafico del volume di usura rispetto alla distanza percorsa e sapendo la velocità lineare del pin ci si è ricavati la corrispondente distanza percorsa dopo 10 secondi.

Una volta nota tale distanza, conoscendo il coefficiente angolare della retta passante per l'origine che mette in relazione volume di usura e distanza percorsa, ci si è ricavati il corrispondente volume di usura alla distanza voluta e lo si è confrontato con le prove di Ansys.



$$y=m*x$$



$$V=m*d$$

Dove:

V =volume di usura;

m = coefficiente angolare;

d =distanza percorsa dal pin;

Il grafico del volume di usura sperimentale rispetto alla distanza percorsa è stato ottenuto con una approssimazione: infatti, dalla sperimentazione non conosciamo il volume di usura in ogni punto oppure ad intervalli della distanza percorsa ma conosciamo solamente il volume di usura finale, ovvero alla fine della prova di usura. Essendo la legge di Archard una legge lineare si è quindi tracciata la retta del volume di usura rispetto alla distanza.

Dalla letteratura, in cui sono state effettuate effettuate anche prove a distanze intermedie, conosciamo che in alcuni casi la legge di Archard è lineare a tratti, ovvero presenterà diversi coefficienti angolari funzioni della distanza percorsa dal pin.

Avendo però solamente noto il volume di usura finale si è usato un solo tratto lineare con un solo coefficiente angolare.

5.1 Risultati sperimentali

Senza ricoprimento

Il volume dopo 10 s è stato ricavato con una estrapolazione lineare. Si ricorda anche in questo caso che l'extrapolazione di soli 10 secondi risulta un po' forzata; d'altra parte, i lunghi tempi di simulazione non permettevano una simulazione di durata maggiore.

Raggio [mm]	Volume dopo 10 s [mm ³]	Volume finale [mm ³]
3,5	$4,57 \cdot 10^{-4}$	0,1840
1	$2,18 \cdot 10^{-4}$	0,0876
2	$5,4 \cdot 10^{-4}$	0,2174

Con ricoprimento

Con il ricoprimento la situazione è complicata dal fatto che sono presenti nel modello due materiali: il materiale sottostante e il materiale dato dal ricoprimento; per tale motivo saranno necessariamente presenti due coefficienti di usura, uno relativo allo strato di grafene e uno relativo al substrato.

Il ricoprimento, essendo di spessore nanometrico, si presume presenti lieve usura ma, allo stesso tempo, esso ha durata breve nel tempo: è questo il motivo per cui il volume finale di usura dei provini ricoperti è simile a quello senza ricoprimento.

Per questo motivo sono state impiegate le prove sperimentali in cui si è esaminata la rimozione del solo strato di grafene: così facendo si è impiegato un solo coefficiente di usura.

Le simulazioni, in questo caso, serviranno a ricavare il volume dell'usura per l'iniziale strato di grafene.

Raggio [mm]	Volume dopo 10 s [mm ³]	Volume finale [mm ³]
3,4 (grafene 3h)	$5,7 \cdot 10^{-5}$	0,000268
3,6 (grafene 6h)	$4,03 \cdot 10^{-5}$	0,00045

5.2 Risultati Ansys: senza ricoprimento

I coefficienti “a” e “b” sono stati scelti in modo che il volume di usura e la pressione del pin sul disco fossero dello stesso ordine di grandezza del caso sperimentale.

A titolo di esempio si riportano i risultati per il provino non ricoperto a raggio 2 mm ottenuti ponendo entrambi i coefficienti pari a 1: qui i coefficienti quindi non hanno alcuna influenza nell’analisi.

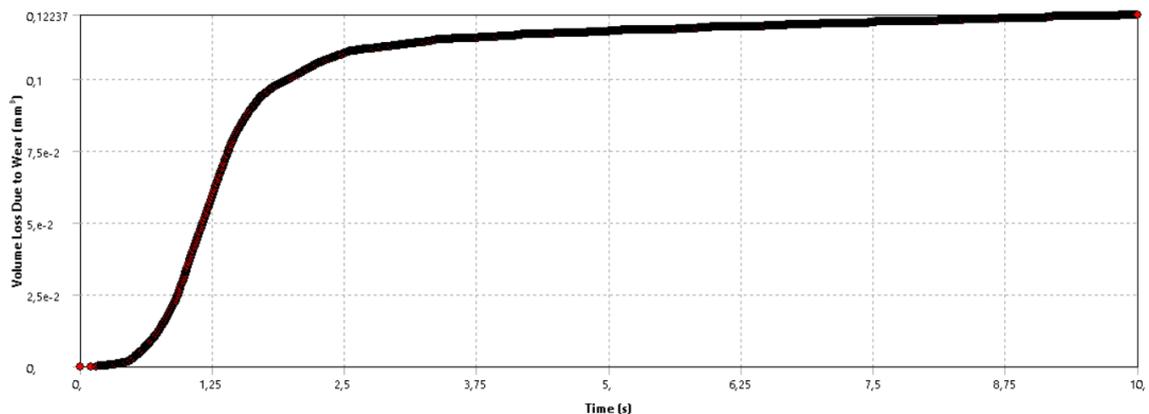


Figura 46. Il volume di usura per provino in alluminio a raggio medio 2 mm con coefficienti a,b=1

Il volume di usura ottenuto non presenta caratteristica lineare ed inoltre presenta un volume decisamente più alto ($0,123 \text{ mm}^3$) rispetto al corrispondente volume di usura a 10 s.

Queste due conclusioni spingono a cercare altri coefficienti “a” e “b”.

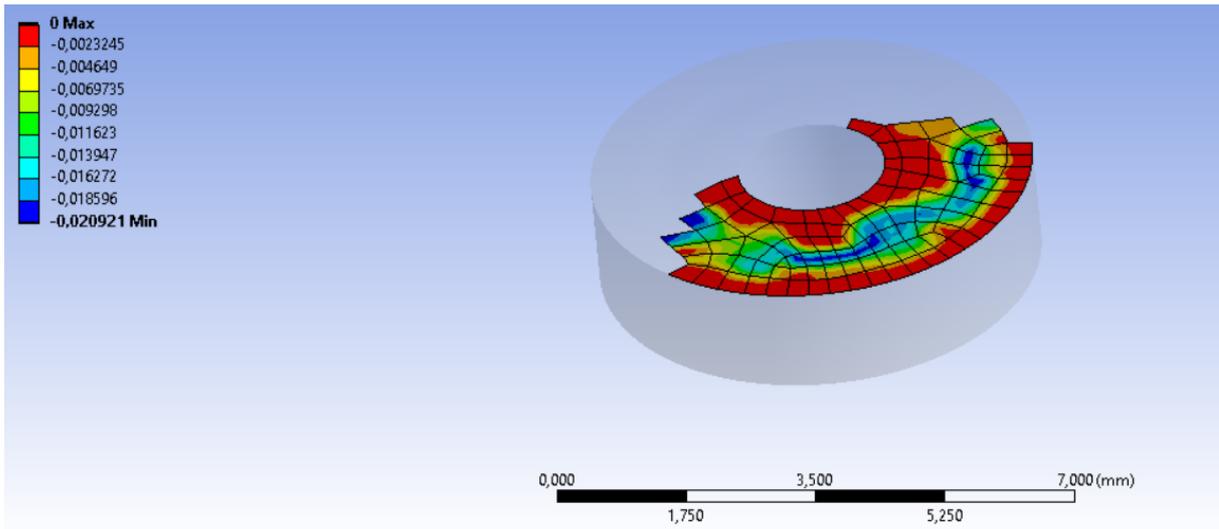


Figura 47. Profondità di usura per provino in alluminio a raggio medio 2 mm con coefficienti $a,b=1$

In alcuni punti del disco il calcolo della profondità di usura non riesce ad essere attuato dal programma. La profondità di usura, dipendendo dal volume di usura, risulta anch'essa non esatta ed essa risulta sovrastimata. I coefficienti però risultano correttamente predire l'irregolarità della traccia di usura: si può notare dalla legenda di Fig.47 che risultano esserci delle zone blu con profondità massima ma che esse non sono ugualmente distribuite lungo la circonferenza d'azione del pin.

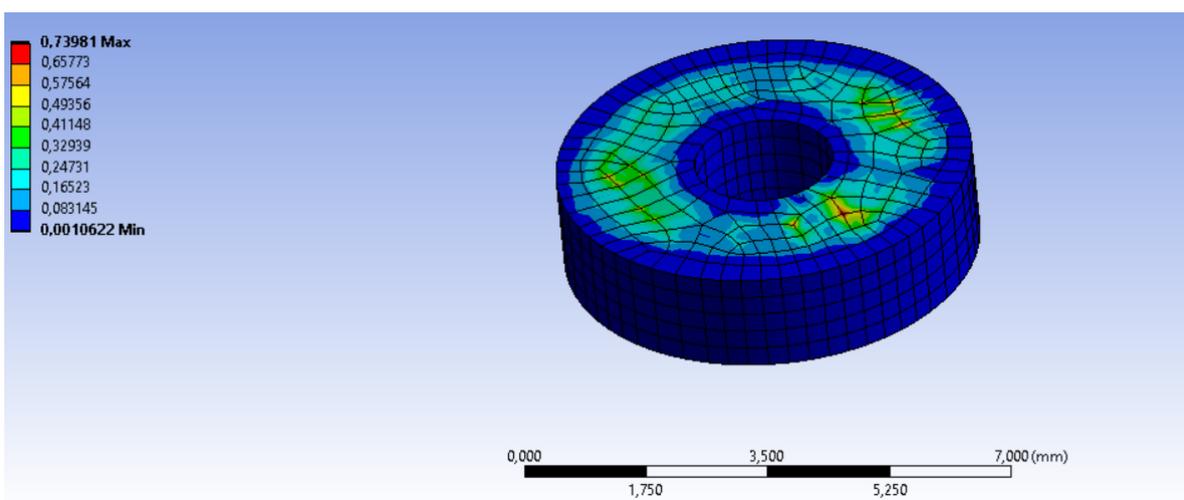


Figura 48. Stress secondo Von Mises per provino in alluminio a raggio medio 2 mm con coefficienti $a,b=1$

Dalla Fig. 48 si nota come lo stress secondo Von Mises sia anch'esso errato. All'inizio della prova, la pressione era di 522 MPa (calcolata secondo Hertz) a cui si andava a sommare una τ_{max} di 165 MPa. Sebbene lo stress di Von Mises sia calcolato alla fine della prova e venga tenuto quindi in conto il cambio di geometria – da un caso sfera su piano si passa a un caso di sfera su conca – esso risulta esageratamente basso per una prova di soli 10 secondi.

Lo stress di Von Mises così basso è stato ottenuto poiché Ansys non è riuscito a calcolare la pressione, come si vede da Fig.49 : il risultato calcolato è 0 ed è evidentemente errato, motivo per cui si prosegue nella iterazione per ricavare i corretti coefficienti “a” e “b”.

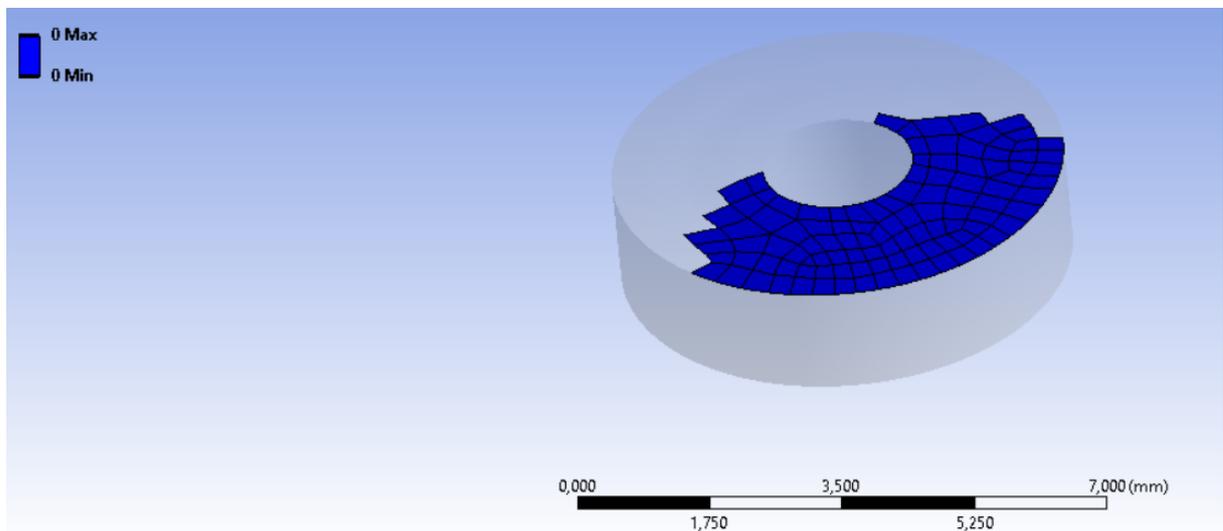


Figura 49. Pressione per provino in alluminio a raggio medio 2 mm con coefficienti a,b=1

Implementando la formula di Archard in Ansys, iterativamente si sono trovati i valori dei due esponenti, di pressione e velocità, per far sì che volume simulato e sperimentale coincidessero per ordine di grandezza. Risulta essere:

a=0,6 (esponente di pressione)

b=0,1 (esponente di velocità)

Raggio [mm]	Volume sperimentale [mm ³]	Volume Ansys [mm ³]
3,5	4,57*10 ⁻⁴	5,11*10 ⁻⁴
1	2,18*10 ⁻⁴	3,19*10 ⁻⁴
2	5,4*10 ⁻⁴	8,47*10 ⁻⁴

Per ogni caso si sono trovati i valori di volume di usura nel tempo, spessore della traccia di usura e stress secondo Von Mises.

Dalla teoria si ricava che:

$p_{\max} = 533$ MPa mentre $\tau_{\max} = 165$ MPa ottenendo quindi uno stress equivalente di Von Mises pari a $\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = 732$ MPa. Le simulazioni, invece, forniscono in uscita un valore più elevato dello stress calcolato; tale risultato può essere interpretato con il fatto che la geometria simulata è differente dall'originale: con l'usura non si ha più il contatto sfera-piano bensì sfera-conca. Inoltre, il calcolo originario non tiene in conto il fenomeno dell'attrito; il coefficiente di attrito, per i provini in alluminio, è molto elevato e ciò va ad incidere sulle τ , aumentandole sensibilmente. Di seguito si riportano i risultati ottenuti; lo stress di Von Mises calcolato si riferisce al risultato finale nella posizione finale assunta dal pin sul disco, a differenza del caso a $r=3,5$ mm.

Caso 1: raggio 3.5 mm

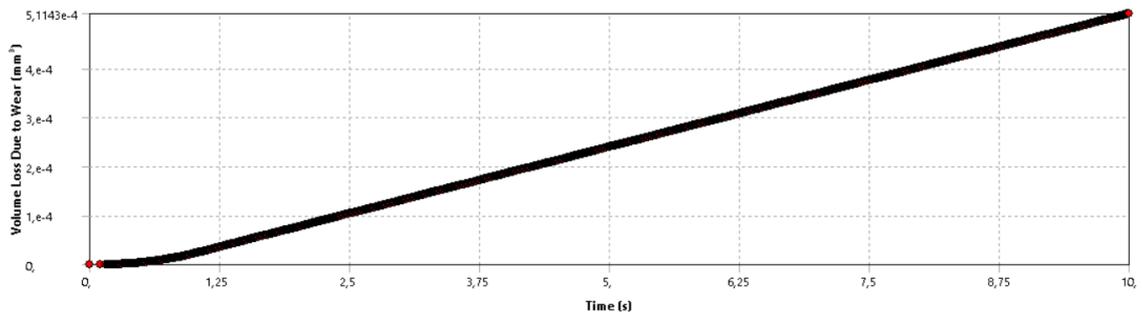


Figura 50. Volume di usura

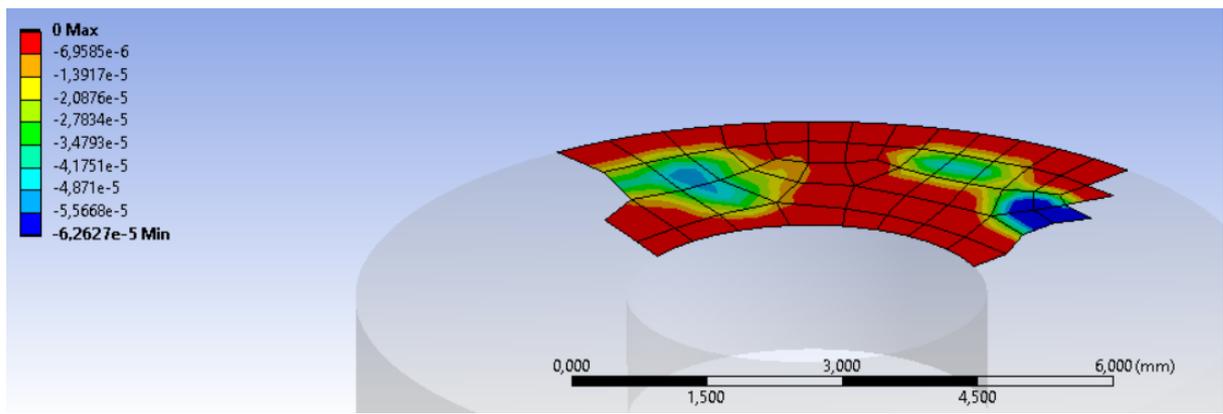


Figura 51. Profondità di usura in mm

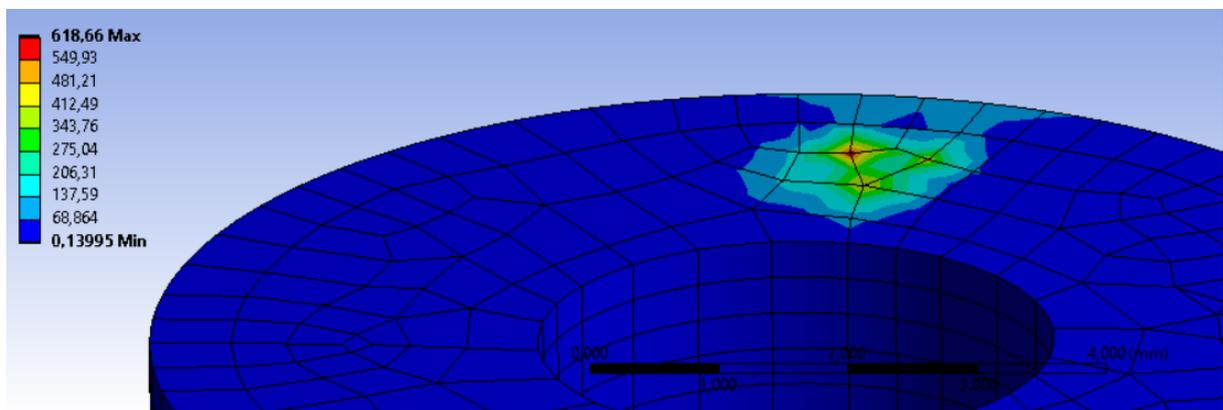


Figura 52. Andamento dello stress di Von Mises in MPa

Caso 2: raggio 1 mm

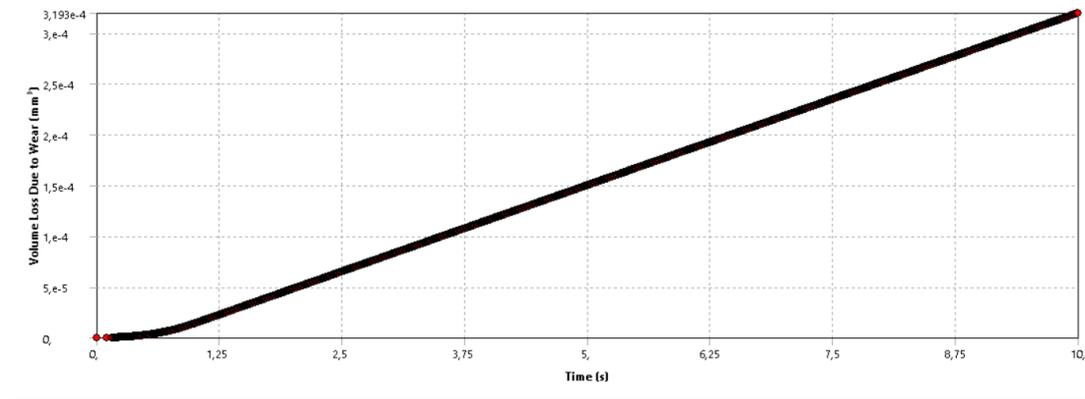


Figura 53. Volume di usura

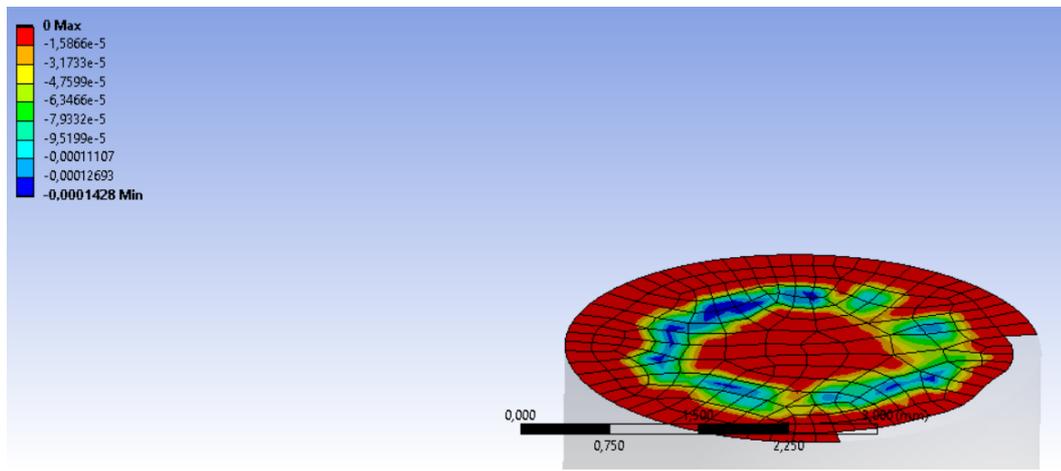


Figura 54. Profondità di usura in mm

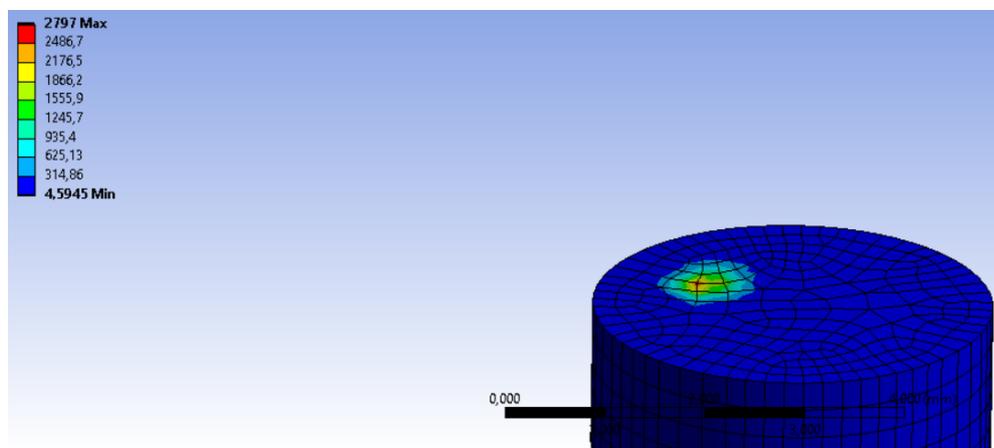


Figura 55. Andamento dello stress di Von Mises in MPa

Caso 3: raggio 2 mm

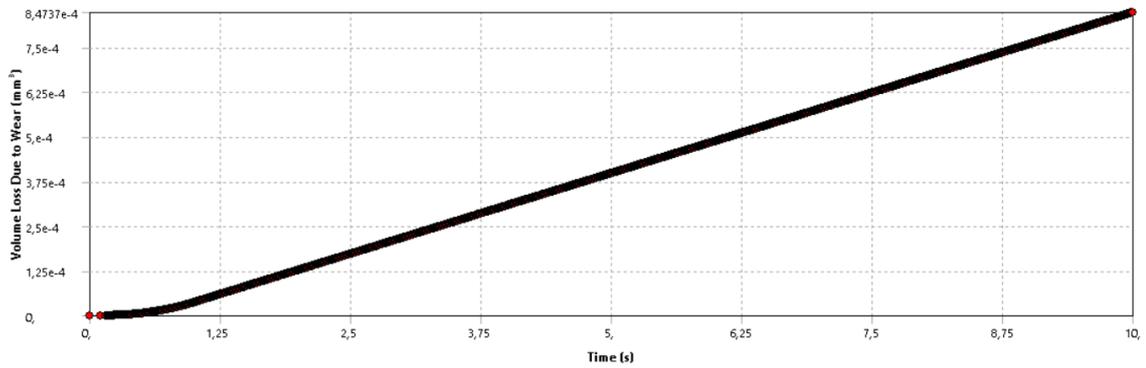


Figura 56. Volume di usura

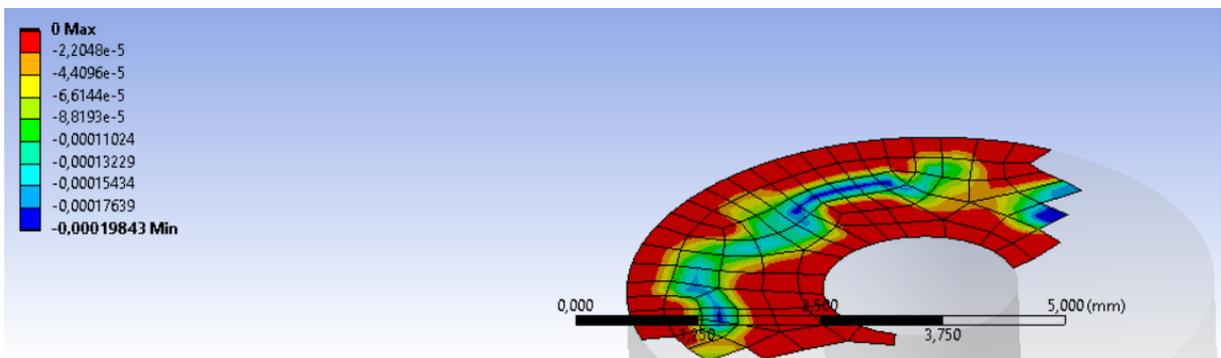


Figura 57. Profondità di usura in mm

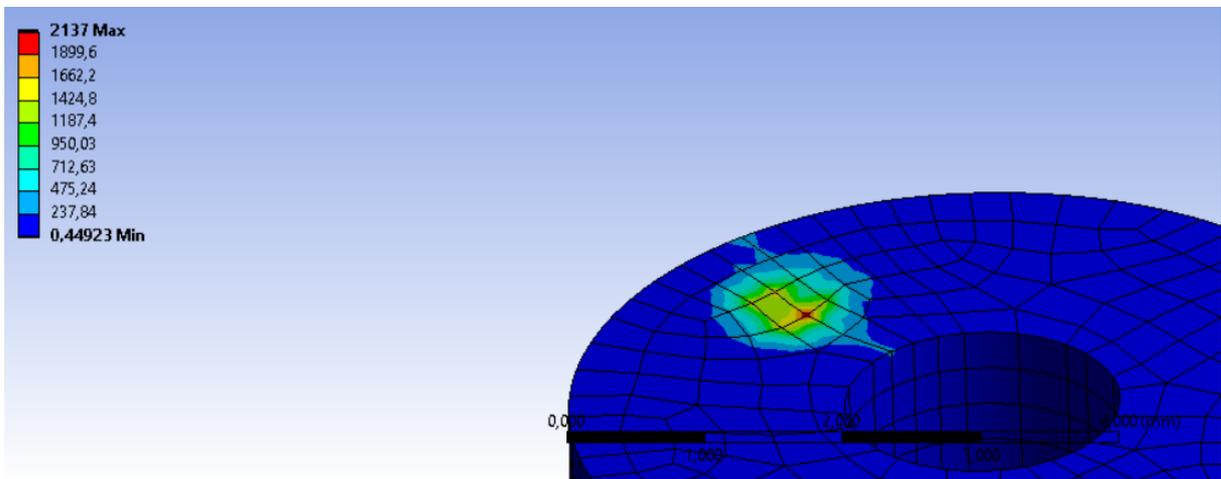


Figura 58. Andamento Stress in MPa

5.3 Risultati Ansys con ricoprimento – fino a rimozione grafene

Come per i provini non ricoperti da grafene si osserva una buona corrispondenza per i volumi di usura (stesso ordine di grandezza); lo stress di Von Mises in questo caso risulta circa il doppio di quello calcolato, infatti dalla teoria di Hertz si otteneva una p_{max} di 1172 MPa e una τ_{max} di 363 MPa, ottenendo uno stress di Von Mises pari a 1329 MPa; tali risultati possono essere imputati al fatto che qui il coefficiente di attrito incide poco sulle τ poiché sensibilmente più basso.

Si riportano i risultati:

Raggio [mm]	Volume sperimentale [mm ³]	Volume Ansys [mm ³]
3,6	$5,7 \cdot 10^{-5}$	$7,51 \cdot 10^{-5}$
3,4	$4,03 \cdot 10^{-5}$	$4,13 \cdot 10^{-5}$

Test 1 – grafene 3h - 3,6 mm

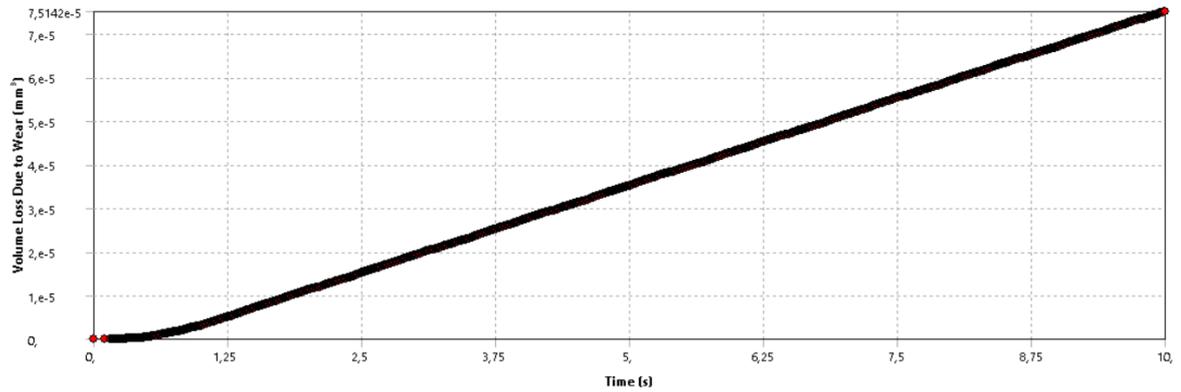


Figura 59. Volume di usura

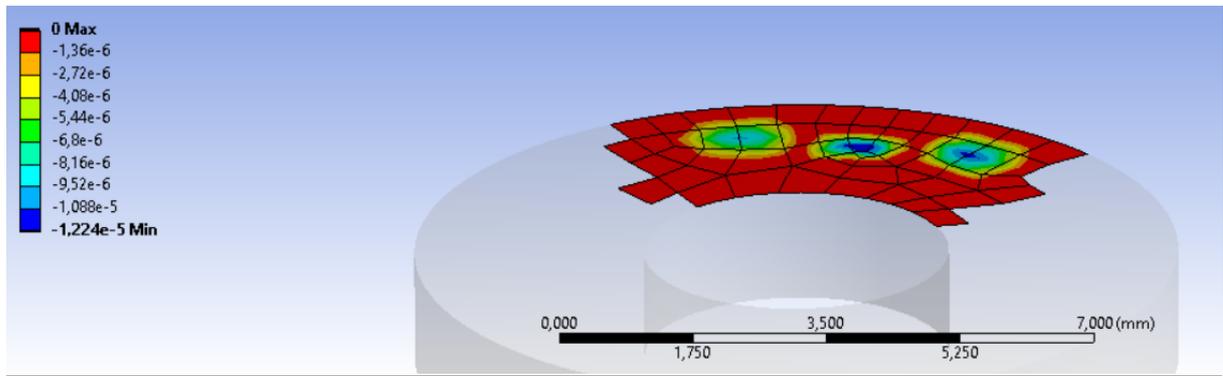


Figura 60. Profondità di usura in mm

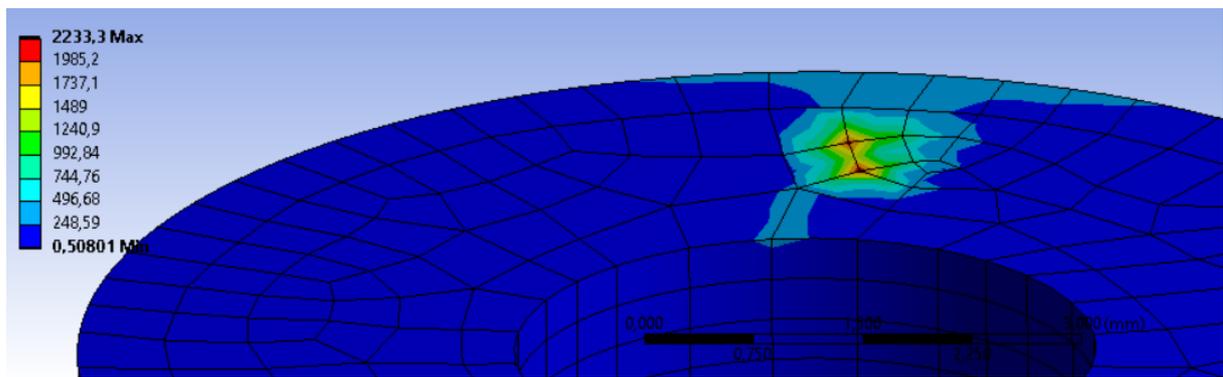


Figura 61. Andamento dello stress di Von Mises in MPa

Test 2 – grafene 6h - 3,4 mm

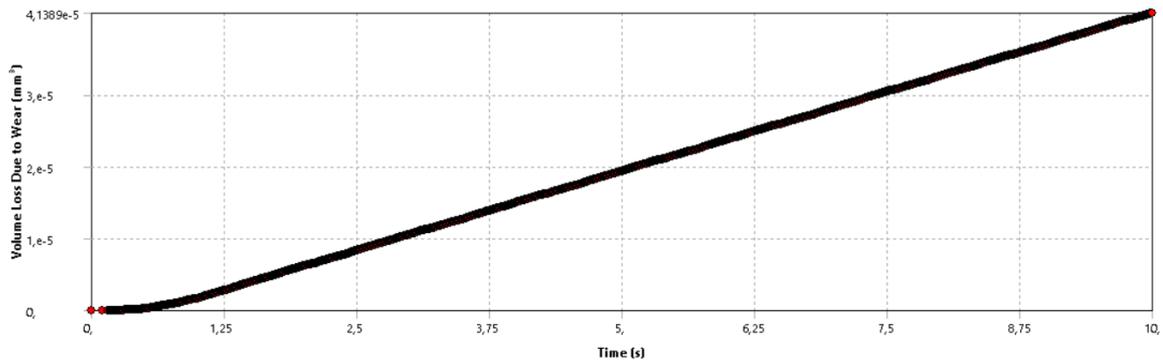


Figura 62. Volume di usura

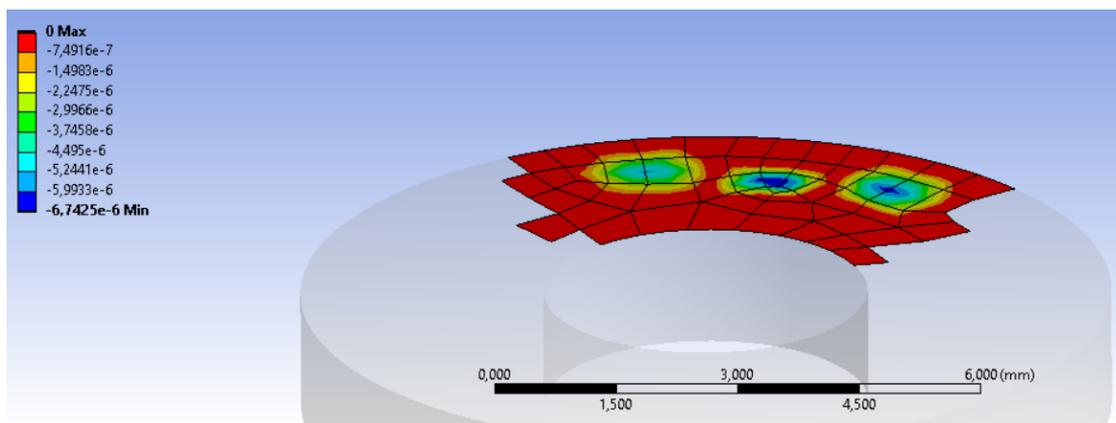


Figura 63. Profondità di usura in mm

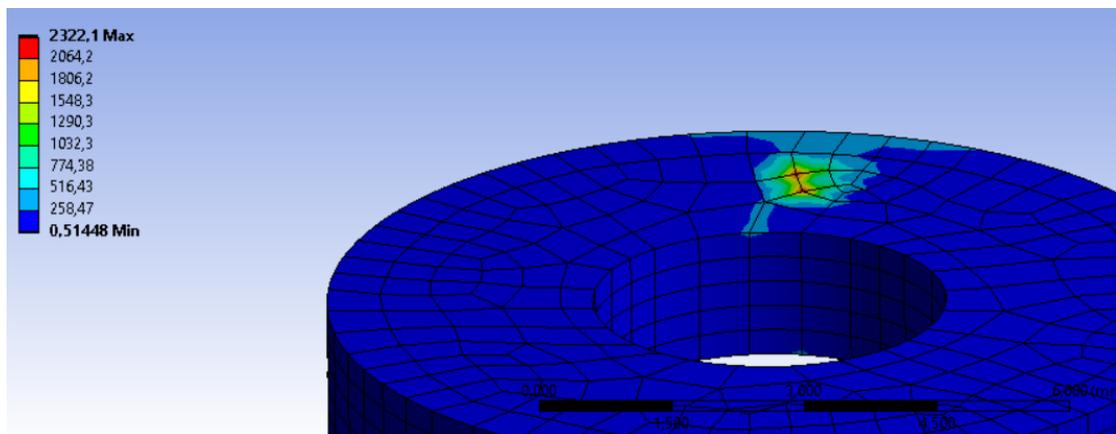


Figura 64. Andamento dello stress di Von Mises in MPa

6. Conclusioni

Questo lavoro si prefigge l'obiettivo di analizzare il comportamento dei ricoprimenti antiusura, ponendo particolare attenzione al grafene, un materiale che recentemente ha catturato interesse a livello tecnologico a causa delle sue numerose proprietà.

Dopo aver realizzato e analizzato sia provini ricoperti in grafene sia in alluminio non ricoperti, tramite il tribometro si è realizzata la prova pin on disc, in cui un disco veniva messo in rotazione per un determinato periodo di tempo sotto un pin fisso. I provini così ottenuti sono stati quindi analizzati per determinare i volumi di usura sperimentali.

Allo scopo di confrontare i risultati sperimentali con quelli di una simulazione, è stato costruito un modello tramite il software a elementi finiti ANSYS e si è calcolato il volume di usura, oltre che altre caratteristiche come profondità della traccia di usura e stress secondo Von Mises.

Le simulazioni, calibrate con parametri ricavati iterativamente e realizzate usando i coefficienti K della legge di Archard ricavati dalla sperimentazione, restituiscono un volume di usura dello stesso ordine di grandezza di quello sperimentale; è da sottolineare il fatto che si sono eseguite prove per una frazione di tempo della prova reale, sfruttando la linearità della legge di Archard che ha permesso di valutare il volume di usura in una frazione di lunghezza percorsa dal pin. Il tempo di 10 secondi non è stato ampliato a causa dei grandi tempi di simulazione, dell'ordine delle ore.

Per quanto riguarda i provini ricoperti in grafene sono state effettuate prove per valutare l'effettiva durata del ricoprimento. Esso risulta durare circa 50 secondi per grafene sonicato 3 ore mentre la durata raddoppia per ricoprimento sonicato 6 ore; inoltre, il volume di usura, in questa prima fase, risulta essere un ordine di grandezza inferiore se confrontato con il volume di usura di un provino non ricoperto, a uguale distanza percorsa.

Il grafene, quindi, si configura come un ottimo materiale per la realizzazione di ricoprimenti antiusura, dal momento che presenta una riduzione del volume di usura di un ordine di grandezza rispetto al materiale che ricopre – nella analisi proposta alluminio - ma, a causa della sua non eccessiva durabilità, è indicato per ricoprimento di parti in movimento relativo fra loro breve e non continuativo. Inoltre, essendo il ricoprimento una operazione non semplice da realizzare, è necessario che si costruisca un metodo industriale efficiente per costruire il ricoprimento.

7. Bibliografia

Alawadhi E. M., Finite Element Simulations Using ANSYS, Second Edition, Londra, CRC Press, 2016.

Xiaolin C., Yijun L., Finite Element Modelling and Simulation with ANSYS Workbench, Londra, CRC Press, 2015.

Boniardi M., D'Errico F., Micari F., Il problema dell'usura negli organi meccanici, in *"Trasmissioni meccaniche"*, 15 aprile 2004.

Kauzlarich J. J., Williams J. A., Archard wear and component geometry, in *"Journal of engineering tribology"*, 1 aprile 2001.

Liu F., Leslie I., Williams S., Fisher J., Jin Z., Development of computational wear simulation of metal-on-metal hip resurfacing replacements, in *"Journal of Biomechanics"*, Volume 41, issue 3, 2008, pag. 686-694.

McColl I. R., Ding J., Leen S.B., Finite element simulation and experimental validation of fretting wear, in *"Wear"*, volume 256, issues 11-12, giugno 2004, pages 1114-1127.

Sayer W., Wear predictions for a simple-cam including the coupled evolution of wear and load", in *"Lubrication Engineering"*, volume 57, Fasc. 9, settembre 2001.

Benjamin L., Farshid S., Sachin S., Mittelbach M., A numerical and Experimental Investigation of Fretting Wear and a New Procedure for Fretting Wear Maps", in *"Tribology Transactions"*, Vol. 55, 2012, issue 3.

8. Sitografia

- [1], [2],[7] <https://steelnavigator.ovako.com>, maggio 2020
- [3],[4] <https://astmsteel.com>, maggio 2020
- [5], [6] <https://mtacciai.com>, maggio 2020
- [8] <https://grantadesign.com>, maggio 2020
- [9] <http://www.solid.unito.it/PUBBLICAZIONI/PUB2014-11-NOISI.pdf>, maggio 2020
- [10] <https://chimica.online.it>, maggio 2020
- [11], [12] <https://www.chimdocet.it>, maggio 2020
- [13],[14] <https://www.engineerplant.it>, maggio 2020

9. Ringraziamenti

Desidero ringraziare il mio relatore, il professor Andrea Mura, per la gentilezza, la professionalità e la disponibilità dimostrate in questi mesi: questo periodo si è rivelato molto particolare per la situazione di emergenza sanitaria e ha portato tutti noi a lavorare in una maniera completamente differente ma non per questo con minore attenzione o minor crescita personale.

Ringrazio la mia correlatrice, la professoressa Francesca Maria Curà, già mia relatrice per la tesi di laurea triennale, per non aver mai smesso di credere in me e nelle mie capacità per un solo istante, aiutandomi ad affrontare non solo l'università ma anche la vita.

Un ultimo ringraziamento va alla mia famiglia e, in particolare, a mia mamma, che per me rappresenta una certezza, che ogni giorno mi dà la forza di affrontare la vita e mi ricorda la persona che sono.

Infine, voglio riportare una delle poesie che più amo, "If" di J. R. Kipling; essa ha un intento educativo-pedagogico: afferma che una persona può ritenere di essere veramente adulta se riesce a confrontarsi con il prossimo per arricchire la propria persona, senza mai dimenticare ciò che è veramente.

(EN) «

If you can keep your head when all
about you
Are losing theirs and blaming it on you;
If you can trust yourself when all men
doubt you,
But make allowance for their doubting
too:
If you can wait and not be tired by
waiting,
Or being lied about, don't deal in lies,
Or being hated, don't give way to
hating,
And yet don't look too good, nor talk
too wise;

If you can dream—and not make
dreams your master;
If you can think—and not make

(IT) «

Se saprai mantenere la calma quando
tutti intorno a te
la perdono, e te ne fanno colpa.
Se saprai avere fiducia in te stesso
quando tutti ne dubitano,
tenendo però considerazione anche del
loro dubbio.
Se saprai aspettare senza stancarti di
aspettare,
O essendo calunniato, non rispondere
con calunnia,
O essendo odiato, non dare spazio
all'odio,
Senza tuttavia sembrare troppo buono,
né parlare troppo saggio;

Se saprai sognare, senza fare del sogno il
tuo padrone;
Se saprai pensare, senza fare del

thoughts your aim,
If you can meet with Triumph and
Disaster
And treat those two impostors just the
same:
If you can bear to hear the truth you've
spoken
Twisted by knaves to make a trap for
fools,
Or watch the things you gave your life
to, broken,
And stoop and build 'em up with worn-
out tools;

If you can make one heap of all your
winnings
And risk it on one turn of pitch-and-
toss,
And lose, and start again at your
beginnings
And never breathe a word about your
loss:
If you can force your heart and nerve
and sinew
To serve your turn long after they are
gone,
And so hold on when there is nothing in
you
Except the Will which says to them:
"Hold on!"

If you can talk with crowds and keep
your virtue,
Or walk with Kings—nor lose the
common touch,
If neither foes nor loving friends can
hurt you,
If all men count with you, but none too
much:
If you can fill the unforgiving minute
With sixty seconds' worth of distance
run,
Yours is the Earth and everything that's
in it,
And—which is more—you'll be a Man,
my son!

»

pensiero il tuo scopo,
Se saprai confrontarti con Trionfo e
Rovina
E trattare allo stesso modo questi due
impostori.
Se riuscirai a sopportare di sentire le
verità che hai detto
Distorte dai furfanti per abbindolare gli
sciocchi,
O a guardare le cose per le quali hai dato
la vita, distrutte,
E piegarti a ricostruirle con i tuoi logori
arnesi.

Se saprai fare un solo mucchio di tutte le
tue fortune
E rischiarlo in un unico lancio a testa e
croce,
E perdere, e ricominciare di nuovo dal
principio
senza mai far parola della tua perdita.
Se saprai serrare il tuo cuore, tendini e
nervi
nel servire il tuo scopo quando sono da
tempo sfiniti,
E a tenere duro quando in te non c'è più
nulla
Se non la Volontà che dice loro: "Tenete
duro!"

Se saprai parlare alle folle senza perdere
la tua virtù,
O passeggiare con i Re, rimanendo te
stesso,
Se né i nemici né gli amici più cari
potranno ferirti,
Se per te ogni persona conterà, ma
nessuno troppo.
Se saprai riempire ogni inesorabile
minuto
Dando valore ad ognuno dei sessanta
secondi,
Tua sarà la Terra e tutto ciò che è in
essa,
E — quel che più conta — sarai un
Uomo, figlio mio!»

