



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali DTG

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica e Meccatronica

Curriculum Meccanico

IL GRAFENE: MATERIALE INNOVATIVO E PERFORMANCE SPORTIVA

**GRAPHENE: INNOVATIVE MATERIAL AND SPORTS
PERFORMANCE**

RELATORE: Prof. Mirto Mozzon

LAUREANDO: Marco Meneghini

matricola 1046092

ANNO ACCADEMICO 2022\2023

INDICE

SOMMARIO	5
INTRODUZIONE.....	6
CAPITOLO 1: GENERALITA'	8
1.1 Cos'è il Grafene, un po' di storia.....	8
1.2 Forme allotropiche	9
1.3 Struttura reticolare.....	13
CAPITOLO 2: PRODUZIONE DEL GRAFENE.....	15
2.1. Metodi di produzione del Grafene	15
2.1.1 Esfoliazione meccanica	15
2.1.2 Esfoliazione chimica	16
2.1.3 Crescita Epitassiale.....	18
2.1.4 Deposizione Chimica di Vapore (CVD).....	19
2.2 Confronto tra i Metodi Produttivi	21
2.3 Cenni sui costi di produzione	22
Capitolo 3: PROPRIETA'	24
3.1 Proprietà Meccaniche	24
3.2 Proprietà Elettriche.....	25
3.3 Proprietà Termiche	26
3.4 Proprietà Ottiche	28
3.5 Proprietà a confronto	30
Capitolo 4: Applicazioni e Performance Sportiva.....	31
4.1 Potenzialità e possibilità	31
4.2 Sci Alpino	31
4.2.1 Alto Livello.....	31
4.2.2 Livello Performance	36
4.2.3 Freeride e Touring	38
4.2.4 Scarponi.....	39
4.3 Abbigliamento sportivo	40
4.3.1 Sportswear	43
4.3.2 Abbigliamento sanitario.....	44

4.4 Altri sport	44
4.4.1 Tennis	44
4.4.2Ciclismo.....	45
4.4.3 Running	46
4.5 Altre applicazioni in campo energetico	47
Capitolo 5: Pericolosità	48
5.1 Rischi tossici del grafene	48
CONCLUSIONI	50
Bibliografia/ Sitografia	51

SOMMARIO

L'argomento che ho voluto trattare in questo elaborato è il Grafene. Un materiale di recente scoperta che presente proprietà eccezionali se confrontate con quelle dei materiali più noti. Definito il materiale del futuro, l'entusiasmo e l'interesse è aumentato notevolmente in questi anni, anche se rimangono ancora dei dubbi relativi alla sua produzione su vasta scala in ambito industriale.

Dopo una prima parte dove si espongono le generalità di questo materiale, la sua scoperta, la sua struttura, passiamo a descrivere e ad approfondire alcuni metodi di produzione. Passeremo poi ad analizzare le proprietà meccaniche, elettriche, termiche e ottiche e le confronteremo con quelle di altri materiali noti, mettendo in evidenza le grandi qualità che lo caratterizzano. Nel quarto capitolo, invece, andremo a vedere quali sono le sue aree di applicazione ed entreremo più nel dettaglio nel suo uso in ambito sportivo per aumentare le performance. Ci soffermeremo più nello specifico nel suo utilizzo per la produzione di sci. Infine, parleremo dei possibili rischi legati alla tossicità del grafene.

INTRODUZIONE

Nulla come il progresso tecnologico definisce il funzionamento dell'orologio del mondo. La storia ci insegna che l'uomo non ha mai interrotto la sua avanzata tecnologico-scientifica: fu il bisogno di risolvere problemi pratici che si è dimostrato spesso uno stimolo allo sviluppo della scienza e della tecnologia. Nel corso dei secoli lo sviluppo tecnologico è stato il metro di misura del progresso ed ha scandito, con le sue innovazioni, il susseguirsi dei cambiamenti economici e sociali della comunità civile, scientifica e militare. Infatti, innovazione significa realizzazione di un nuovo prodotto oppure utilizzo di una nuova tecnologia di produzione oppure miglioramento del metodo produttivo. Non c'è quindi da stupirsi che in tanti settori si insista sulla ricerca e sviluppo di nuovi materiali e applicazioni. La tecnologia si è evoluta parallelamente alle nostre necessità, rendendo possibile qualcosa che negli anni precedenti sembrava impossibile così da superare i limiti. Anche nello sport la prestazione cammina pari passo con lo sviluppo tecnologico e con l'utilizzo di materiali innovativi volti ad alzare sempre di più l'asticella della performance. Vista la mia esperienza e passione nel mondo dello sport, ed in particolare dello sci alpino, ho voluto affrontare come argomento della mia tesi un materiale innovativo: il grafene. Definito il "materiale delle meraviglie" a causa delle sue eccezionali proprietà chimico-fisiche, il grafene promette di rivoluzionare il futuro molti campi della tecnologia, dall'elettronica all'energetica, dal settore ambientale a quello spaziale e infine a quello sportivo. Le aspettative legate a questo materiale innovativo continuano a crescere, trattandosi di un materiale sorprendentemente versatile con un ampio range di applicazioni. La parola "limite" fa pensare ad un punto di arrivo che impedisce di andare oltre. Tuttavia oggi nessuno sa con assoluta certezza quale sia il limite a cui ragionevolmente un essere umano possa aspirare, non solo nello sport, ma anche in tutti gli altri ambiti. Per questo motivo l'uomo è alla continua ricerca di superare i limiti anche nel mondo dello sport. Per esempio quarant'anni fa nessuno avrebbe mai immaginato che un atleta potesse fare gli incredibili record di oggi. Ogni anno o poco più, c'è un atleta che corre un po' più veloce, un altro che salta un po' più in alto, un altro che riesce a sollevare un po' di più e così via... Ma dovrà pur arrivare il punto o la soglia oltre il quale il corpo umano non può andare? È possibile stabilire una volta per tutte questa soglia? La storia dei record ci

dice che non si può dare mai nulla per scontato. La ricerca su materiali innovativi come il grafene e lo sviluppo delle nuove tecnologie ad esso correlate richiedono tempo ed investimenti; quindi, forse un vero impatto nella nostra vita si avrà tra 10 – 20 anni. Siamo, infatti, solo all'inizio di questa nuova avventura scientifica. Il premio Nobel Andre Geim, rispondendo a chi domandava notizie sui possibili usi del grafene, ha detto: “A cosa serve il grafene? Non lo so. È come presentare un pezzo di plastica a un uomo di un secolo fa e chiedergli cosa ci si può fare. Un po' di tutto, penso”.

Un “po' di tutto” che esprime quanto la strada sia lunga, ma anche quanto sia ricca di nuove ed entusiasmanti prospettive. Nell'ambito tecnico-scientifico sembra non ci siano limiti. E questo grazie alla curiosità e all'immaginazione che caratterizzano il genere umano, qualità che ci spingeranno ad andare oltre i confini della tecnologia di oggi, oltre le nostre aspettative.

Per citare un aforisma di Einstein: “L'immaginazione è più importante della conoscenza. La conoscenza è limitata, l'immaginazione abbraccia il mondo, stimolando il progresso, facendo nascere l'evoluzione”.

CAPITOLO 1: GENERALITA'

1.1 Cos'è il Grafene, un po' di storia

Il Grafene è un materiale composto da carbonio, ma a differenza di grafite e diamante, ha proprietà tecnologiche uniche che lo rendono uno dei materiali del futuro.

È un materiale formato da uno strato bidimensionale di atomi di carbonio disposti in celle esagonali legati tra di loro in modo da formare un reticolo cristallino denominato "a nido d'ape".

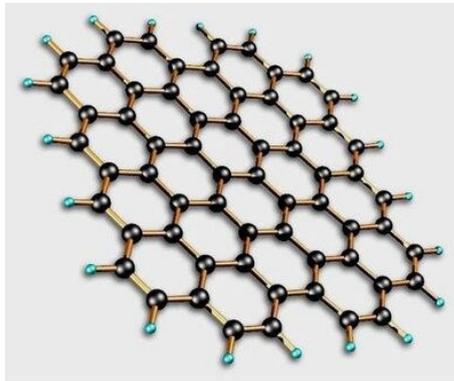


Figura 1.1 Struttura a nido d'ape del grafene

Negli ultimi anni si parla sempre di più di grafene che, grazie alle sue eccellenti proprietà tecnologiche, viene etichettato come "materiale del futuro". La sua scoperta avvenne nel 2004, quando due scienziati russi dell'Università di Manchester, Andre Geim e Konstantin Novoselov, riuscirono ad isolare un foglio di spessore monoatomico di grafite. Il loro obiettivo era quello di ottenere uno strato di grafite il più sottile possibile e per farlo iniziarono ad asportare materiale da polvere di grafite usando del semplice nastro adesivo. Ad ogni passaggio parte della polvere veniva asportata, fino a ottenere un singolo strato di atomi di carbonio che, in seguito, venne identificato come grafene. Se riprendiamo l'esempio della grafite e del libro, il nastro adesivo permise di rimuovere pagina dopo pagina ogni livello di carbonio, fino ad ottenere un foglio di grafene. Questa scoperta portò i due scienziati ad essere insigniti del Premio Nobel per la Fisica nel 2010. Il materiale ha suscitato fin da subito un elevato interesse, tanto da

aver spinto l'UE a fondare nel 2013 il Graphene Flagship. Il progetto, della durata di 10 anni, prevede un complessivo stanziamento di 1 miliardo di euro da investire nella ricerca sul materiale e sulle sue applicazioni industriali.[1]



Figura 1.2 Andre Geim e Konstantin Novoselov

[3] Trattandosi di un materiale costituito da uno strato monoatomico (quindi spesso un atomo, cioè tra 0,1 e 0,5 nanometri), sul grafene convergono gli orizzonti delle nanotecnologie. In occasione del Mobile World Congress del 2018 a Barcellona, questo materiale tecnologico ha avuto un proprio padiglione in cui sono stati presentati 25 diversi prototipi di dispositivi elettronici realizzati con l'uso del grafene, come smartphone, dispositivi wearable e per lo smart living.

1.2 Forme allotropiche

[2] Il grafene è una delle molteplici forme allotropiche del carbonio. In natura il carbonio si trova sotto forma di materiali completamente diversi per caratteristiche e proprietà. Infatti, oltre alle strutture macroscopiche più note, come la grafite e il diamante, esso è in grado di formare delle nano-strutture che hanno caratteristiche

chimico-fisiche molto differenti. A livello microscopico la struttura dei legami prende il nome di forma allotropica e il carbonio ne presenta differenti tipi.

Le forme con cui si presenta in natura il carbonio sono: diamante, grafite, fullerene, nanotubi di carbonio e appunto il grafene.

Descriviamo in breve queste forme:

- Il Diamante

[1] È un solido rigido, trasparente, elettricamente isolante. È la sostanza più dura che si conosca, infatti occupa il primo posto nella scala mohs. Il diamante è costituito da atomi di carbonio in coordinazione tetraedrica con altri atomi uguali, con giunzione lungo le 4 direzioni di legame. Si ottiene una struttura a maglie tridimensionali. Se si considerano le posizioni dei centri degli atomi, la visualizzazione della struttura del diamante è assai più semplice: si avranno atomi di carbonio nelle posizioni di una cella CFC, più altri 4 atomi in interstizi tetraedrici. La struttura è pertanto nota come struttura “diamond cubic” (DC).

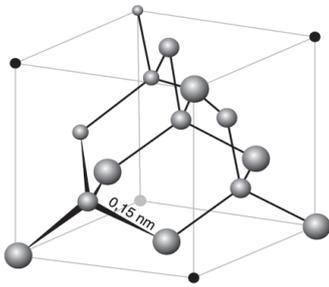


Figura 1.3 Struttura diamante



Figura 1.4 Diamante

- Grafite

Il carbonio solido si trova più comunemente sotto forma di grafite. La Grafite ha una struttura esagonale compatta e risulta essere un ottimo conduttore termico ed elettrico, possiede inoltre un'elevata temperatura di fusione. Considerando ogni atomo di carbonio al centro di un triangolo, 3 elettroni esterni si possono localizzare in 3 regioni dello spazio dirette lungo le 3 congiungenti il centro del triangolo con i suoi vertici, determinando 3 direzioni di legame. In tal caso gli atomi di carbonio si collegano l'uno all'altro formando maglie esagonali. Si possono così costruire dei piani di atomi di

carbonio, legati tra loro da legami di tipo debole. Ne risulta per la grafite la ben nota sfaldabilità. Comunemente è impiegata per la produzione di matite ed elettrodi.

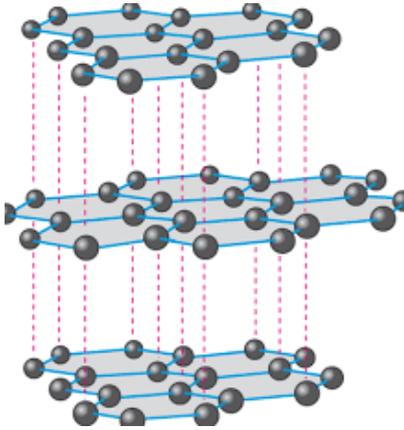


Figura 1.5 Struttura grafite



Figura 1.6 Grafite

- Fullerene

risulta essere simile alla grafite nella struttura, con la differenza che gli atomi di carbonio si dispongono in modo pentagonale ed esagonale. La struttura è quindi tridimensionale e risulta essere cava. Esempio, il C₆₀, il più famoso tra i fullereni è composto da 60 atomi di carbonio situati ai vertici di 12 pentagoni e 20 esagoni. Questo gli conferisce una forma a pallone da calcio.

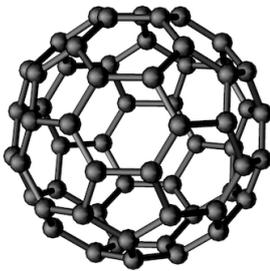


Figura 1.7 Struttura fullerene



Figura 1.8 Fullerene

- Nanotubi di Carbonio

risultano avere la medesima struttura del fullerene, ma in forma tubolare che possiamo immaginare come un rotolo di un piano di grafite. La sua struttura è formata da elementi pentagonali ed esagonali. È molto resistente a trazione e ha proprietà elettriche dipendenti dalla sua chiralità (il modo in cui si susseguono esagoni e pentagoni), per

questo motivo può essere impiegato sia come conduttore, sia come semiconduttore. È molto utilizzato nell'elettronica, per la produzione di transistor e led.

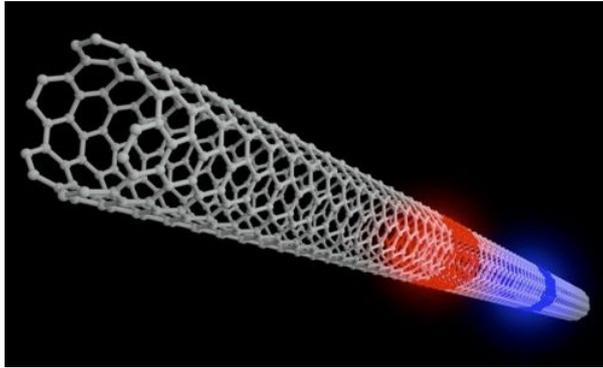


Figura 1.9 Struttura nanotubi di carbonio

Tutte queste strutture che abbiamo citato hanno proprietà fisiche così particolari che si possono descrivere come puntiformi, bidimensionali o tridimensionali.

Esse sono:

- a. i fullereni: sfere cave di carbonio, come strutture 0-dimensionali (figura 1.10 c)
- b. i nanotubi di carbonio, vere e proprie strutture tubolari approssimabili a dei segmenti, come strutture 1- dimensionali (figura 1.10 d)
- c. il grafene come struttura bidimensionale (figura 1.10 e)
- d. la grafite e il diamante come solidi tridimensionali (figure 1.10 a, 1.10 b)

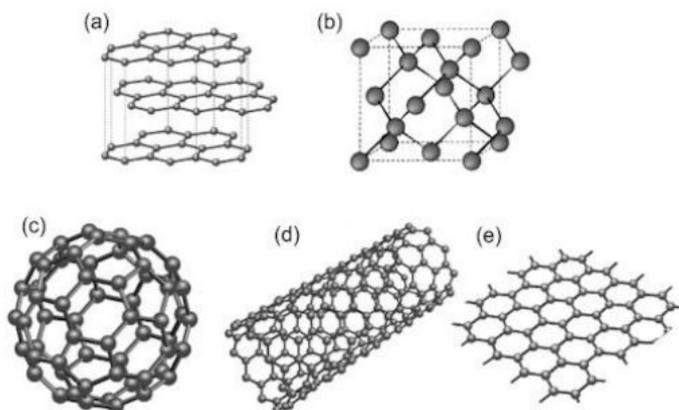


Figura 1.10 Forme allotropiche del carbonio a)grafite; b)diamante;
c)fullerene; d)nanotubi in carbonio; e)grafene

Arriviamo così alla forma allotropica per noi interessante: il Grafene.

Il grafene rappresenta in sintesi la forma allotropica del carbonio con struttura bidimensionale caratterizzata da un singolo piano di grafite, con gli atomi legati tra loro in modo da formare un reticolo cristallino denominato “a nido d’ape”. La scoperta di questo materiale ha destato enorme interesse per le sue proprietà. Infatti, oltre ad essere il più sottile tra i materiali esistenti, potendosi appunto definire bidimensionale, mostra una resistenza meccanica 200 volte maggiore di quella dell’acciaio, e una conducibilità elettrica e termica superiore a quella di qualsiasi altro materiale. È la struttura del grafene a permettere queste eccezionali proprietà. I suoi atomi sono disposti in maniera esagonale perfetta. Andiamo ora ad analizzare più nel dettaglio la sua struttura.

1.3 Struttura reticolare

Il carbonio è uno degli elementi più conosciuti, comuni e studiati ed è un elemento fondamentale nell’evoluzione tecnologica dell’uomo. L’ elemento chimico carbonio è un non metallo, è alla base di tutta la chimica organica e del grafene.



Figura 1.11 Diamante e grafite

[2] Il carbonio ha numero atomico 6, significa che ha 6 protoni e 6 elettroni, due dei quali occupano l’orbitale 1s, mentre i restanti 4 sono elettroni di valenza, occupano parzialmente gli orbitali 2s e 2p. Questi due orbitali hanno energie molto simili e gli elettroni che li occupano possono muoversi tra di essi molto facilmente, generando così il fenomeno dell’ibridizzazione, fenomeno nel quale gli orbitali atomici 2s e 2p si “fondono” e le funzioni d’onda degli elettroni che li occupano si “mischiano”; in

particolare, quando un elettrone dell'orbitale 2s si "mischia" con n elettroni dell'orbitale 2p si parla di ibridizzazione sp-n. La possibilità di ibridizzarsi in modo diverso porta il carbonio a formare le diverse strutture che sono state menzionate in precedenza. Quando c'è ibridizzazione sp¹, cioè quando un solo orbitale 2s si mischia con uno 2p, l'orbitale ibrido può instaurare un forte legame covalente con un altro atomo identico, creando la base per una catena di legami tutti uguali; questo è il caso del carbyne, teoricamente il materiale più duro disponibile, allotropo trovato per ora solo nella polvere interstellare. Nel caso in cui due orbitali 2p, che possiamo chiamare 2p_x e 2p_y, si uniscono ad un orbitale 2s, siamo in ibridizzazione sp², in cui ogni atomo ha a disposizione tre legami σ sul piano x-y con cui può formare un reticolo a nido d'ape.

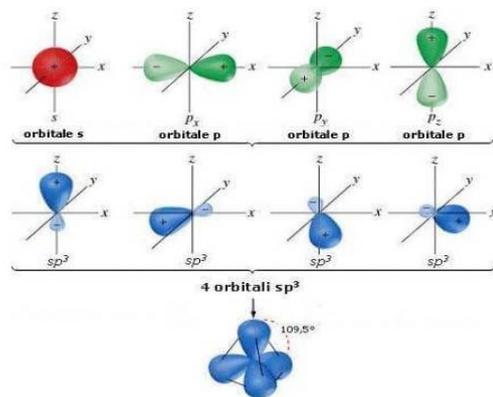


Figura 1.12 Ibridazione sp³

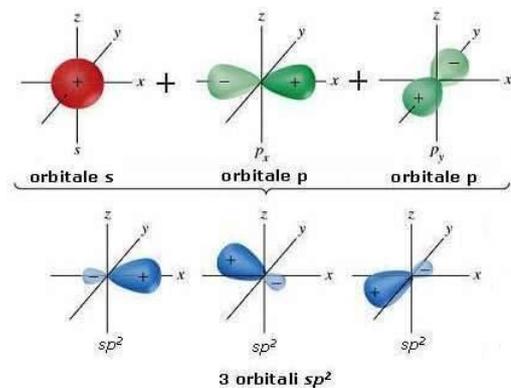


Figura 1.13 Ibridazione sp²

L'ibridazione sp² è quella da cui si originano le nanostrutture di Fullereni, Nanotubi e del Grafene. L'ibridazione sp³ invece, è quella tipica del diamante. Il reticolo cristallino del grafene presenta una struttura esagonale a nido d'ape, in cui ogni atomo è in grado di legarsi a tre atomi adiacenti, posti a 120° l'uno dall'altro.

CAPITOLO 2: PRODUZIONE DEL GRAFENE

2.1. Metodi di produzione del Grafene

Come abbiamo già visto, il grafene è stato isolato per la prima volta nel 2004 quasi per gioco, passando dello scotch su un blocchetto di grafite. Questa tecnica semplice ed economica prende il nome di esfoliazione meccanica. Da quel momento in poi sono state sperimentate nuove tecniche di produzione del grafene, ognuna finalizzata alle caratteristiche e applicazioni che si vogliono ottenere.

[2] Le strategie principali di produzione si raggruppano in 3 metodi riferiti a: fase solida, fase liquida e fase gassosa.

Nel primo tipo di processo produttivo troviamo l'esfoliazione meccanica, la precipitazione elettrostatica e la crescita epitassiale.

Nel secondo tipo di processo produttivo troviamo la riduzione, la dispersione con ultrasuoni e la sintesi organica.

Nel terzo, infine, troviamo la CVD ovvero la Chemical Vapor Deposition.

Andiamo ora ad analizzare le più comuni tecniche di sintesi del Grafene.

2.1.1 Esfoliazione meccanica

[4] Come detto in precedenza, il Grafene venne isolato per la prima volta tramite una tecnica semplice ed economica, divenuta nota come il metodo "scotch-tape" o appunto esfoliazione meccanica. Questa tecnica prevede l'utilizzo di un nastro adesivo con il quale si 'strappano' alcuni strati di una particolare grafite denominata HOPG (Highly Ordered Pyrolytic Graphite). Questo è possibile data la struttura della grafite, che è costituita da piani sovrapposti e legati dalle deboli forze di Van der Waals che la rendono facilmente sfogliabile [7]. Il primo strato di grafite viene rimosso a causa della sua ossidazione dovuta al contatto con l'esterno, dopodiché si procede con l'esfoliazione finché gli strati rimanenti sul nastro sono invisibili ad occhio nudo. In

poche parole, non si fa altro che premere il nastro contro altro nastro su cui si è depositata la grafite e poi strapparla via. Alla fine del processo, gli strati di grafite, detti anche fiocchi o “flakes”, sono pronti per essere trasferiti in maniera semplice su un substrato isolante, in genere silicio oppure ossido di silicio, e si procede alla pulizia del campione dalle tracce di colla lasciate dal nastro adesivo tramite un lavaggio in acetone ed isopropanolo.

L’esfoliazione meccanica è al momento il metodo più semplice ed accessibile per isolare fiocchi di grafene: i campioni così preparati esibiscono le migliori caratteristiche elettriche e meccaniche allo scopo di analisi di laboratorio. Questo metodo non è invece adatto per una produzione di tipo industriale.

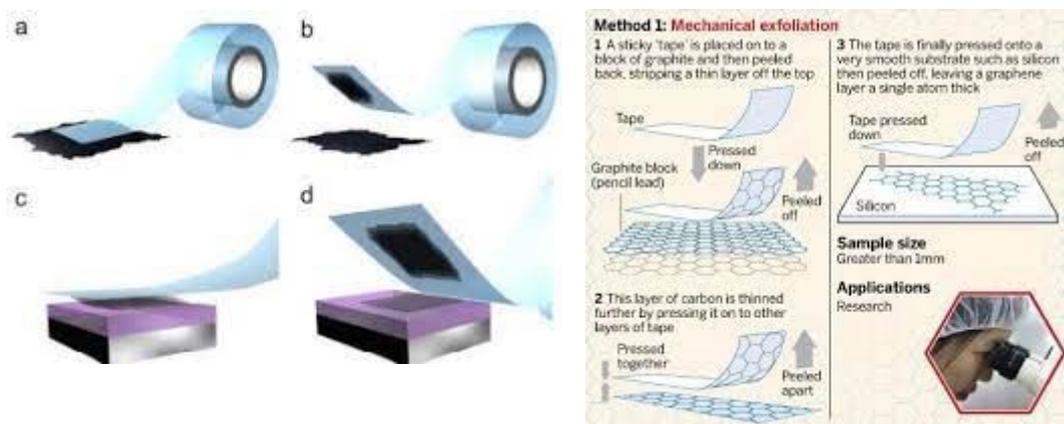


Figura 2.1 Esfoliazione meccanica

2.1.2 Esfoliazione chimica

L’ esfoliazione chimica fa parte dei metodi di produzione in fase liquida; in questa tecnica si sfruttano processi chimici che portano all’isolamento di singoli piani di grafene a partire da polvere di grafite sospesa su un solvente chimico. Si possono ottenere risultati differenti a seconda del tipo di solvente utilizzato.

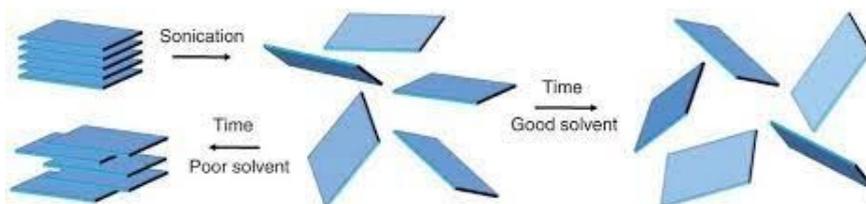


Figura 2.2 Schema esfoliazione in fase liquida

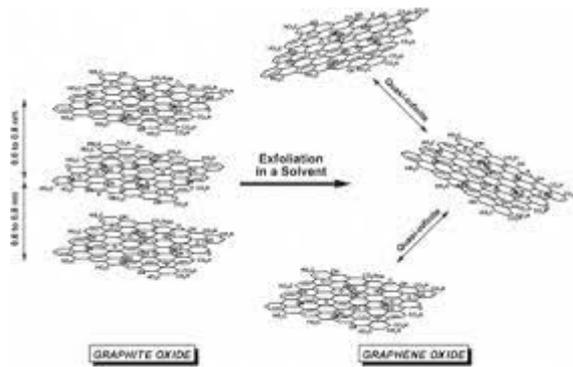


FIGURA 2.3 ESFOLIAZIONE CHIMICA

[2] La variante più classica prevede l'uso di polvere di grafite, la quale viene immersa in un opportuno solvente. Esso tende a penetrare tra i piani di grafite aumentando la distanza tra di loro; dopodiché il composto viene esposto ad ultrasuoni per aumentare la velocità di

dissoluzione dei soluti in determinati solventi. Ecco che i piani di grafite si separano e il solvente impedisce la loro riunificazione. A questo punto è necessario separare i costituenti della soluzione tramite un processo di centrifugazione chiamato Density Gradient Ultracentrifugation.

Le variabili su cui è più intensa l'attività di ricerca in questo metodo di produzione sono:

- la scelta del solvente adatto;
- il materiale grafite di partenza;
- la scelta del tipo di ultrasuoni (bagno o sonificatore ad alta potenza);
- la durata della sonicazione e centrifugazione.

[5] Un ulteriore procedimento di esfoliazione chimica in fase liquida può essere effettuato sostituendo la normale grafite usata nei metodi precedenti con dell'ossido di grafite, un materiale avente la stessa struttura lamellare della grafite, nel quale però alcuni atomi di carbonio presentano legami con ossigeno sotto forma di idrossili o di carbonili (più raramente epossidi e carbossili). La presenza di questi composti a base di ossigeno fa sì che la distanza interlamellare aumenti a causa dell'ingombro sterico, facendola quasi raddoppiare.

La superficie dell'ossido di grafite risulta essere idrofilica, quindi se immerso in acqua, l'ossido di grafite si "scioglie" facilmente, anche per la grande distanza a cui si trovano i suoi piani, ciò rende facile per le molecole d'acqua infiltrarsi tra i piani senza la necessità di dover fornire grandi quantità di energia attraverso la sonicazione. È proprio per questo motivo che si usa l'acqua come solvente. Per ottenere grafene puro è

necessario sottoporre l'ossido a riduzione, rompendo i legami tra carbonio e ossigeno, utilizzando anche energia termica o sotto forma di radiazioni.

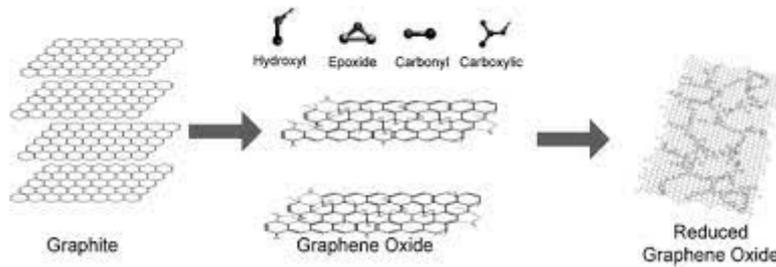


Figura 2.4 Sintesi e riduzione

Il vantaggio di questa tecnica è quello di riuscire a produrre elevate quantità di grafene che però presenta un elevato numero di difetti che possono andare a compromettere le sue proprietà. Inoltre, non sempre si riescono a produrre campioni monostrato che richiederebbero tecniche molto costose.

2.1.3 Crescita Epitassiale

[3] Questa tecnica fa parte dei metodi di produzione in fase solida, e consiste nell'indurre la crescita di un cristallo di grafene attraverso reazioni ad alta temperatura. In particolare, il metodo si basa sull'isolare strati di grafene partendo da cristalli macroscopici di grafite.

La crescita epitassiale consiste nel far crescere il grafene partendo dal carburo di silicio (SiC), il quale, se posto in una condizione di vuoto e portato ad una temperatura di 1300 °C porta a sublimazione il silicio ed il restante carbonio è "costretto" a riorganizzarsi sulla superficie in uno stato grafitico. A queste temperature elevate, il carbonio è costretto a riorganizzare i suoi reticoli cristallini formando appunto il reticolo a nido d'ape; va a formare quindi degli strati di grafene. È da notare che se il SiC viene riscaldato a 1650°C, si ottengono delle membrane di grafene a singolo strato che risultano essere omogenee e uniformi. In questo modo non vengono intaccate le proprietà termiche ed elettriche del prodotto.

Tuttavia lo strato di grafene che abbiamo ottenuto rimane legato agli strati sottostanti di SiC e prende il nome di "Buffer Layer". Le caratteristiche quindi risultano essere inferiori rispetto a quelle del grafene puro, appunto perché contaminate dal carburo di

silicio. Si è tuttavia scoperto che, modificando adeguatamente l'orientazione della superficie del substrato, è possibile esporre delle facce sulle quali la crescita del grafene avviene senza la formazione del "buffer layer", in quanto gli atomi di carbonio, nella crescita, rompono i propri legami con gli atomi di silicio del substrato. Ecco che le proprietà dello strato ottenuto coincidono con quelle del grafene.

Lo stesso risultato si può ottenere se il substrato invece che essere di SiC è metallico. Ovviamente diversi tipi di metallo portano a diversi risultati.

2.1.4 Deposizione Chimica di Vapore (CVD)

[6] Questa tecnica fa parte dei metodi in fase gassosa ed è l'ultima che andremo ad analizzare in questo elaborato. La Chemical Vapour Deposition (CVD), è una tecnica mediante la quale viene depositato uno strato di materiale su substrati metallici attraverso la decomposizione di molecole di idrocarburi, che forniscono il carbonio necessario alla crescita di un film di grafene. Il vantaggio di questa tecnica sta nel riuscire ad ottenere superfici di diversi cm quadrati di grafene che risultano avere una elevata qualità cristallina e pochi difetti e contaminazioni. Inoltre, risulta facile trasferire il film prodotto su una vasta gamma di substrati per diverse applicazioni.

Analizziamo più nel dettaglio questa tecnica

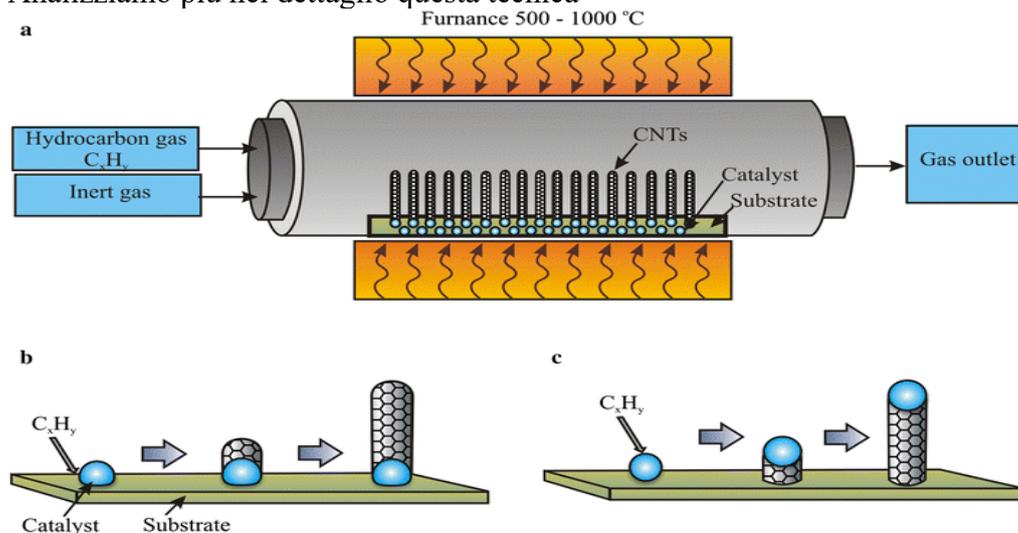


Figura 2.5 Esempio di utilizzo di una fornace per il metodo CVD

Per il processo si utilizza una fornace tubolare di quarzo (che deve essere in grado di sopportare temperature elevate), in essa verranno inseriti i substrati sulla quale il grafene andrà a depositarsi. Di solito i substrati sono in nichel o rame depositati in fase vapore su ossido di silicio.

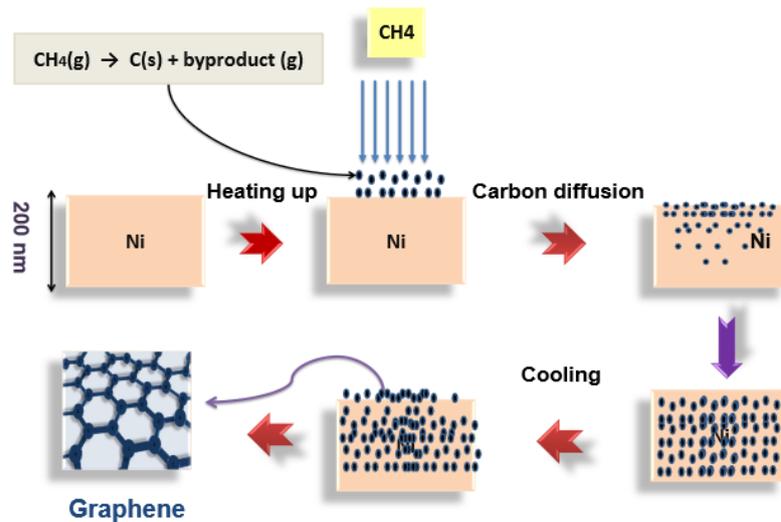


Figura 2.6 Principio di funzionamento del metodo CVD

Dopo un primo riscaldamento del sistema fino a 1000°C, questi substrati metallici vengono sottoposti ad un processo di annealing [9] per rimuovere lo strato di metallo eventualmente ossidato in superficie. L'atmosfera all'interno del tubo riscaldato deve essere controllata in modo da evitare la presenza di ossigeno che si potrebbe legare col carbonio e formare CO_2 ; per cui in genere si usa un'atmosfera riducente con idrogeno biatomico (H_2). Durante questa fase di annealing i metalli all'interno del reattore si liberano da gas, umidità o altri contaminanti presenti sulla loro superficie.

Successivamente il metallo viene esposto ad un flusso di gas contenenti carbonio, come metano (CH_4) o etilene (C_2H_4), che vengono assorbiti dal substrato. A contatto con la superficie, la molecola si scinde e il carbonio si riorganizza in nuove configurazioni.

Il carbonio comincia a configurarsi in forma solida andando a formare la struttura a nido d'ape, mentre il sottoprodotto viene espulso. Dopo alcuni minuti, ecco che otteniamo il substrato ricoperto con un film di grafene.

Per non creare difetti nella struttura del grafene il raffreddamento del sistema deve essere controllato e non essere troppo veloce. Infine, per fare un'analisi delle proprietà del materiale ottenuto, bisogna spostare il film su altri substrati, diversi tra loro in base al tipo di analisi che si vuole effettuare.

2.2 Confronto tra i Metodi Produttivi

Come abbiamo visto, ci sono diversi metodi di produzione del grafene, ognuno dei quali ci consente di ottenere un prodotto con determinate proprietà. È quindi opportuno scegliere il metodo produttivo più adatto in base alle applicazioni finali richieste.

Andiamo a schematizzare un confronto tra i vari metodi in un grafico.

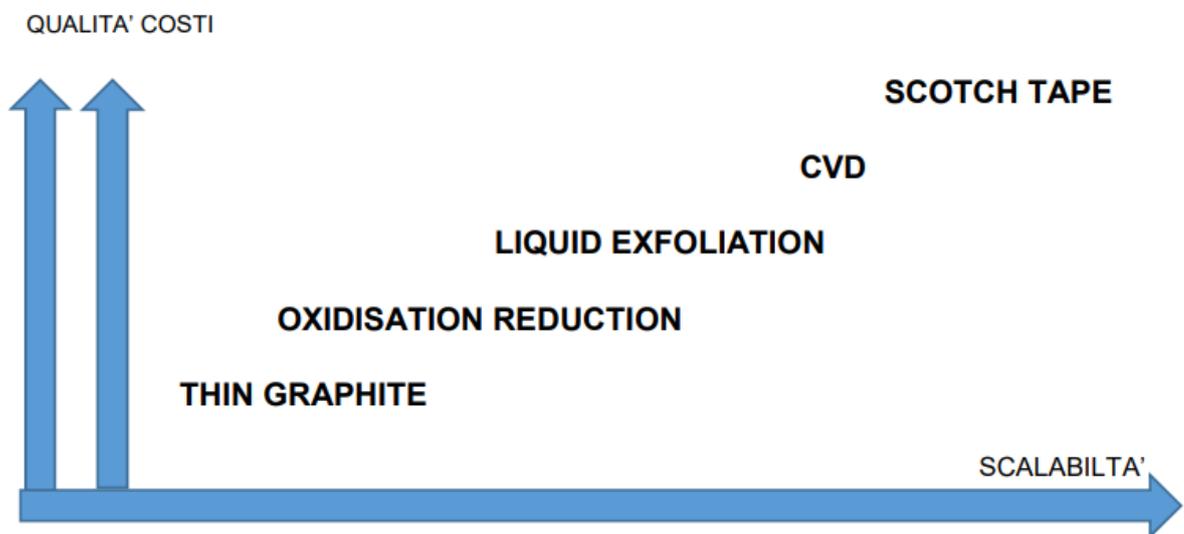


Figura 2.7 Metodi produttivi a confronto

Osservando il grafico possiamo concludere che il metodo di produzione che ci garantisce il miglior compromesso tra scalabilità, costi e qualità è rappresentato dall'essfoliazione a liquido che può essere utilizzato per la produzione del grafene adatto ai nanocomponenti elettronici. Questo tipo di metodo va bene anche per la produzione

su larga scala. Tuttavia, la scalabilità, cioè la produzione su larga scala, resta ancora il più grosso problema del grafene: non si è ancora riusciti ad arrivare a una produzione di massa del grafene che garantisca l'alta qualità del prodotto, che invece si riesce ad ottenere su piccoli campioni.

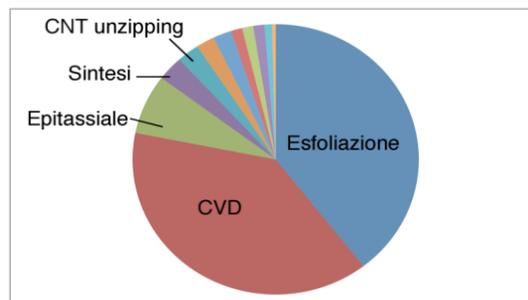


Figura 2.8 Principali metodi brevettati di preparazione di grafene

2.3 Cenni sui costi di produzione

[6] Come detto in precedenza, il grafene si ottiene attraverso l'esfoliazione della grafite utilizzando le varie tecniche di cui abbiamo parlato. La grafite si trova in natura principalmente sotto forma di minerale, ed i costi sono nell'ordine dei 1,5-2 dollari al chilo. Questa fonte è riportata dal "Mineral Commodity Summaries 2013" pubblicato dal Ministero degli Interni americano e dallo US Geological Survey. Il costo quindi è relativamente basso.

Il problema sta nel riuscire a produrre fogli di grafene di dimensioni elevate, infatti, con l'esfoliazione otteniamo film che arrivano ad un massimo di 100-500 nm per lato e spessori compresi tra 1 e 10 strati. Produrre lamine nell'ordine dei centimetri o addirittura metri di lato è ad oggi ancora molto costoso, e per il momento ci si limita a produzioni di laboratorio. La fonte di produzione principale per produrre lamine di grafene a strato singolo di grandi dimensioni attualmente è la CVD, che abbiamo già approfondito, dove il costo di vendita di un foglio 50x50 mm è di circa 250 dollari.

[8] Lo sviluppo di nuove tecniche per abbassare i costi è però in continua evoluzione; infatti, è stato annunciato da un gruppo di ricercatori dell'Università RMIT, Australia, e dell'Istituto Nazionale di Tecnologia, Warangal, India un nuovo metodo che potrebbe

essere rivoluzionario. Il nuovo metodo di produzione del grafene vede l'utilizzo dell'estratto di corteccia di eucalipto e, secondo gli stessi ricercatori, risulta più economico e sostenibile rispetto ai metodi che tradizionalmente si usano per sintetizzarlo.

Secondo Suresh Bhargava, uno degli studiosi impegnati in questo progetto, il costo di produzione del grafene potrebbe scendere addirittura da 100 dollari a 0,5 dollari al grammo. Si tratta di una diminuzione di prezzo che renderebbe praticamente il grafene disponibile per qualsiasi industria, non solo per i grossi centri di ricerca e le aziende più grandi, qualcosa che potrebbe portare ad un grosso passo avanti nell'impiego tecnologico di questo materiale.

Il metodo non vede l'utilizzo di reagenti tossici ed è quindi definito come "sostenibile" dagli stessi ricercatori che parlano di grafene "verde". Questo nuovo sistema usa come agenti riducenti i composti polifenolici presenti nell'estratto della corteccia di eucalipto. Questi composti mostrano prestazioni elettrochimiche simili agli agenti riducenti tradizionali tanto da far dichiarare agli stessi autori dello studio che questo approccio "ha una prospettiva eccellente" non solo per la produzione di grafene, ma anche per quella dei supercondensatori ad alte prestazioni.

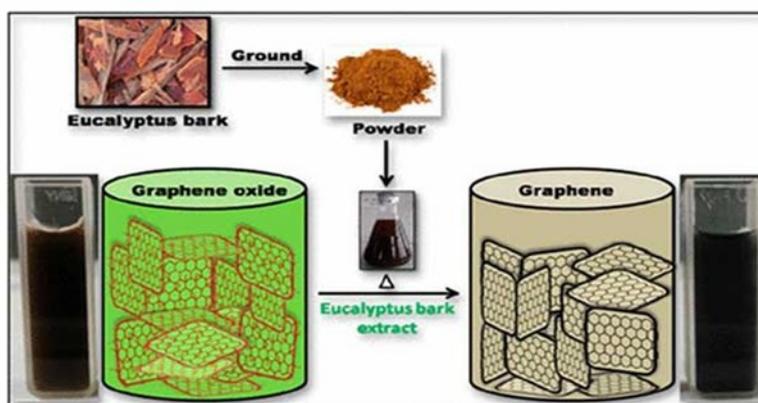


Figura 2.9 Metodi alternativi di sintetizzare il grafene limitando il costo

Capitolo 3: PROPRIETA'

3.1 Proprietà Meccaniche

[11] Più duro del diamante, 300 volte più resistente dell'acciaio e spesso quanto un atomo.

[10] Come prima proprietà andiamo ad analizzare quella meccanica che fa sì che il grafene sia definito come il materiale più resistente scoperto finora. Il grafene si presenta come un materiale estremamente leggero, con una densità superficiale stimata di 77 mg/mm², ma allo stesso tempo risulta essere estremamente resistente. Il suo carico di rottura a trazione è di 130 GPa e il modulo di Young misura 1TPa. Tutti questi valori sono di gran lunga maggiori rispetto a materiali come il diamante o l'acciaio. Tutto questo è dovuto all'ibridazione del Carbonio, considerato il più forte tra tutti i legami chimici, che conferisce questa elevata rigidità meccanica del foglio atomico di grafite.

Andiamo a riportare in tabella un confronto tra moduli di Young di vari materiali.

Materiale	Modulo di Young (GPa)
Grafene	1000
Carburo di tungsteno	550
Carburo di silicio	450
Allumina	390
Ferro	196
Acciaio inox	200
Ghise	180
Rame	124
Silicio	110
Oro	80
Alluminio	70

Tabella 3.1 – Moduli di Young a confronto

Per descrivere la straordinaria resistenza del materiale, i due ricercatori premio Nobel portarono questo paragone: un foglio di grafene delle dimensioni di 1 m² e spesso un atomo, sarebbe in grado di sostenere un gatto di 4Kg, pesare 0,7 mg ed essere virtualmente invisibile.

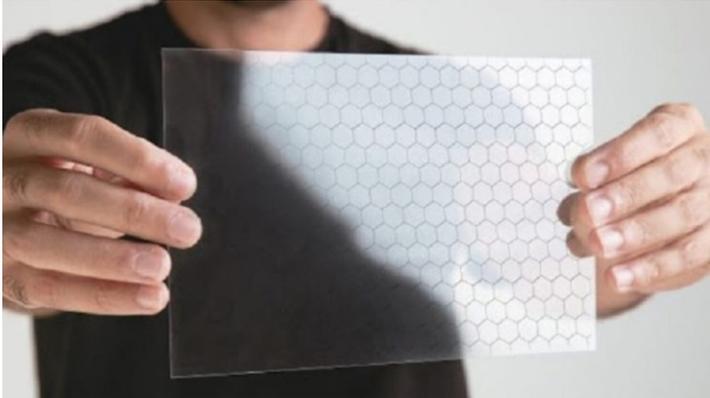


Figura 3.1 Foglio di grafene

3.2 Proprietà Elettriche

[1] Interessante ora andare ad analizzare anche le proprietà elettriche del grafene; anch'esse sono eccezionali se messe a confronto con altri materiali. Il grafene è caratterizzato da un'elevatissima mobilità dei portatori di carica, con valori compresi fra 3000 e 15000 $cm^2 / (V s)$, che a temperatura ambiente può raggiungere picchi di 100000 $cm^2 / (V s)$: possiamo perciò definire il grafene come il materiale a più bassa resistività conosciuto finora ($10^{-8} \Omega m$). Si possono così ottenere densità di correnti superiori a 110 A per centimetro quadro. Questo si traduce nel fatto che il grafene è un ottimo conduttore elettrico.

Le proprietà del grafene

Proprietà elettroniche e di sensing

- Elevatissima mobilità elettronica (TPs) – 200.000 $cm^2/(V \cdot s)$
 - CNT – 100.000 $cm^2/(V \cdot s)$
- Capacità di rilevare fino ad una singola molecola di gas NO₂
- Relazione di dispersione lineare, tramite una variazione delle condizioni esterne il **livello di Fermi** si può muovere

Materiale	Conducibilità elettrica (S·m ⁻¹)
Grafene	$\sim 10^8$
Argento	$63,0 \times 10^6$
Rame	$59,6 \times 10^6$
Oro	$45,2 \times 10^6$
Alluminio	$37,8 \times 10^6$
Acqua di mare	4,8
Acqua potabile	0,0005 to 0,05
N-Esano	100×10^{12}
Aria	0,3 to $0,8 \times 10^{14}$

[12] La grafite è un buon conduttore di cariche elettriche, ma il modo in cui le conduce è abbastanza convenzionale, simile a quello dei metalli. Se però si assottiglia la grafite sino ad arrivare a pochi strati di grafene, gli elettroni sono costretti a

FIGURA 3.2 CONDUCIBILITÀ ELETTRICHE

muoversi lungo il piano di questi fogli. In un singolo foglio di grafene, il movimento degli elettroni è praticamente bidimensionale. Così gli elettroni sono costretti a viaggiare attraverso il reticolo del grafene e questa struttura periodica influenza il loro modo di essere, al punto che gli elettroni viaggiando nel grafene diventano equivalenti a particelle senza massa simili a neutrini, ma elettricamente carichi.

“Studiare l’elettrodinamica quantistica in laboratorio e a temperatura ambiente è come avere il Cern sulla scrivania”

Questo cambiamento è dovuto alla simmetria esagonale del suo reticolo. Gli elettroni nel grafene acquisiscono così un’altissima mobilità, cento volte maggiore di quella che hanno, ad esempio, nei pur velocissimi transistor al silicio; si comportano come particelle balistiche, piccoli proiettili che viaggiano per distanze molto grandi (su scala microscopica) senza essere deviati.

Alcuni studi riportano che in un campione di grafene multistrato, è stata misurata una densità di corrente pari a 1.4×10^9 A/cm² che rappresenta un valore davvero elevato, basti notare che campioni di metallo, a causa dell’effetto joule, arrivano a densità di corrente di 10^7 A/cm² e già subiscono un indebolimento strutturale.

Queste proprietà del grafene lo rendono quindi molto interessante per il mondo dell’elettronica.

3.3 Proprietà Termiche

Anche a livello termico il grafene risulta essere il miglior conduttore di calore presente in natura. Ecco che il suo impiego diventa interessante per quei settori dove diventa fondamentale riuscire a dissipare calore il più velocemente possibile. In elettronica, ad esempio, i circuiti integrati tendono a surriscaldarsi con una conseguente diminuzione delle prestazioni. Quindi risulta di fondamentale importanza per ovviare al problema, disporre di un materiale delle dimensioni atomiche, che presenta un elevato livello nella integrazione della tecnologia CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) e che permetta una rapida dissipazione del calore.

I valori di conducibilità termica, che definisce l'attitudine di una sostanza a trasmettere il calore attraverso la conduzione termica, ottenuti sperimentalmente, variano tra 4800 e 5300 W/ mK. Come fatto in precedenza andiamo a confrontare la conduttanza di vari materiali.

Andiamo a riportare in tabella un confronto tra la conduttanza di vari materiali.

Materiale	Conduttanza (W/ m K)
Grafene	4800
Diamante	900-2300
Argento	430
Rame	400
Oro	318
Alluminio	237
Acciaio inox	12
Rocce	2
Vetro	1,1
Acqua	0,6
Aria	0,025

Tabella 3.2 – Conduttanze a confronto

[15] La tabella ci mostra come il grafene sia superiore a tutti gli altri materiali in termini di conduttanza. Non è però tutto oro ciò che luccica: infatti la difficoltà che sta alla base dello studio delle proprietà termiche del grafene è l'adattabilità delle tecniche generalmente utilizzate per la misura della conducibilità termica nei sistemi tridimensionali, al sistema bidimensionale. Questo mette in evidenza come solo il tempo ci dirà se con nuove tecnologie e processi il grafene potrà diventare il “superconduttore del terzo millennio”.

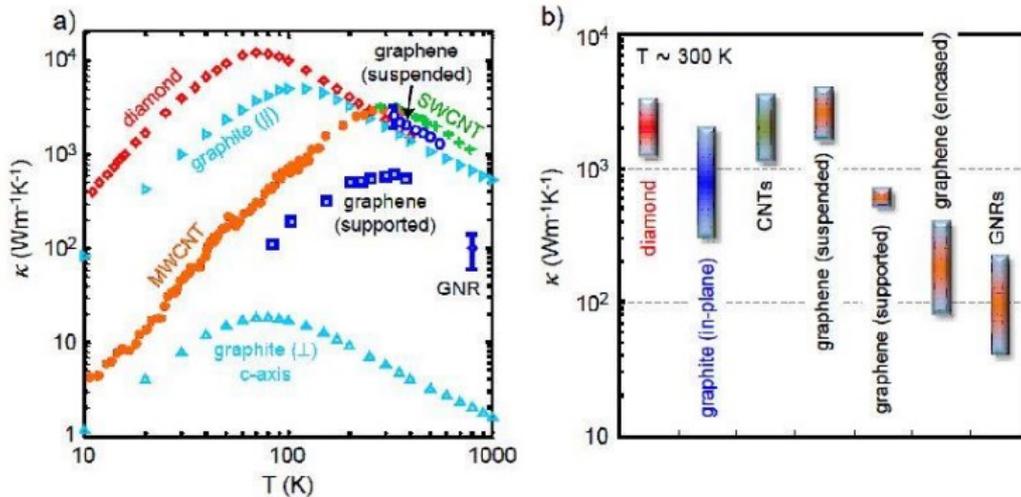


Figura 3.3 Conducibilità termica grafene a) confronto con altri materiali; b) a temperatura ambiente

3.4 Proprietà Ottiche

[3] Altro aspetto interessante è che quando pensiamo al carbonio ci immaginiamo dei materiali scuri ed opachi, come carbone o grafite. Ma come il diamante, anche il grafene si presenta sottoforma di solido trasparente. Peculiarità del grafene è che si lascia attraversare da tutte le radiazioni anche di frequenza differente, dato che un foglio di grafene assorbe soltanto il 2,3% dello spettro luminoso.

La proprietà ottica che andiamo ad analizzare è la trasmittanza, ossia il rapporto tra l'intensità della luce che incide un campione e quella che ne emerge (ovvero è il contrario dell'assorbimento).

Come fatto prima, mettiamo a confronto il grafene con altri materiali in un grafico che mostra la trasmittanza in funzione della lunghezza d' onda.

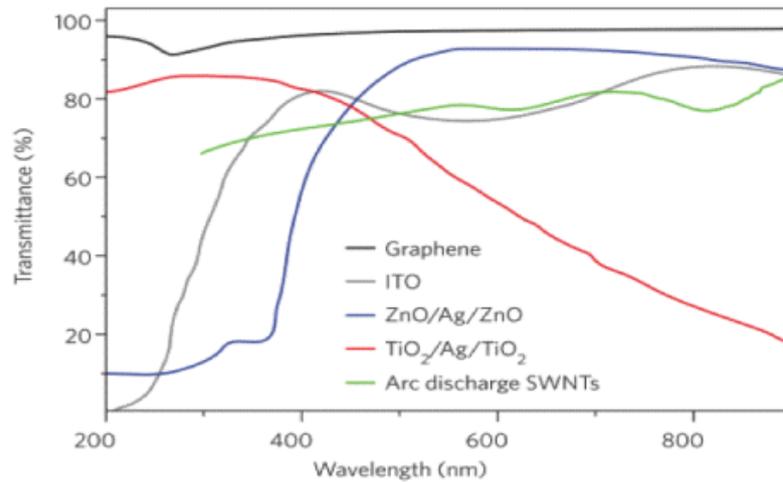


Figura 3.3 Trasmittanze a confronto

Anche qui, il grafico mostra come il grafene risulta essere il materiale che trasmette più luce per ogni lunghezza d'onda che utilizziamo. Una sua applicazione potrebbe prendere piede nella produzione di schermi grazie alla sua flessibilità e resistenza. Il grafene è più flessibile delle alternative ceramiche come l'ossido di indio-stagno e più trasparente rispetto alle pellicole metalliche. Lo strato di grafene ultra-flessibile potrebbe consentire la realizzazione di un'ampia gamma di prodotti, inclusa l'elettronica arrotolabile.

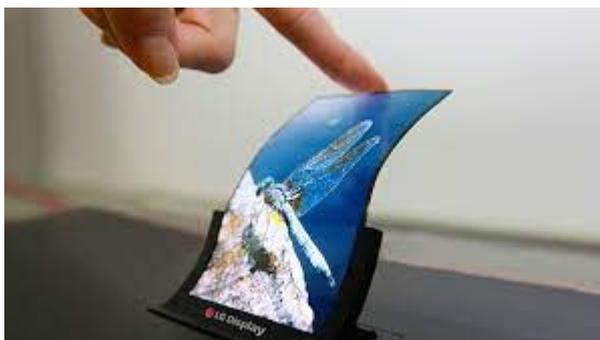


Figura 3.4 Schermo pieghevole

3.5 Proprietà a confronto

Dopo aver visto quali sono le principali proprietà di questo materiale straordinario e potenzialmente superiore a tutti gli altri sotto diversi aspetti, andiamo a riassumerle e a mettere i valori del grafene a confronto con altri materiali dall'elevato interesse tecnologico.

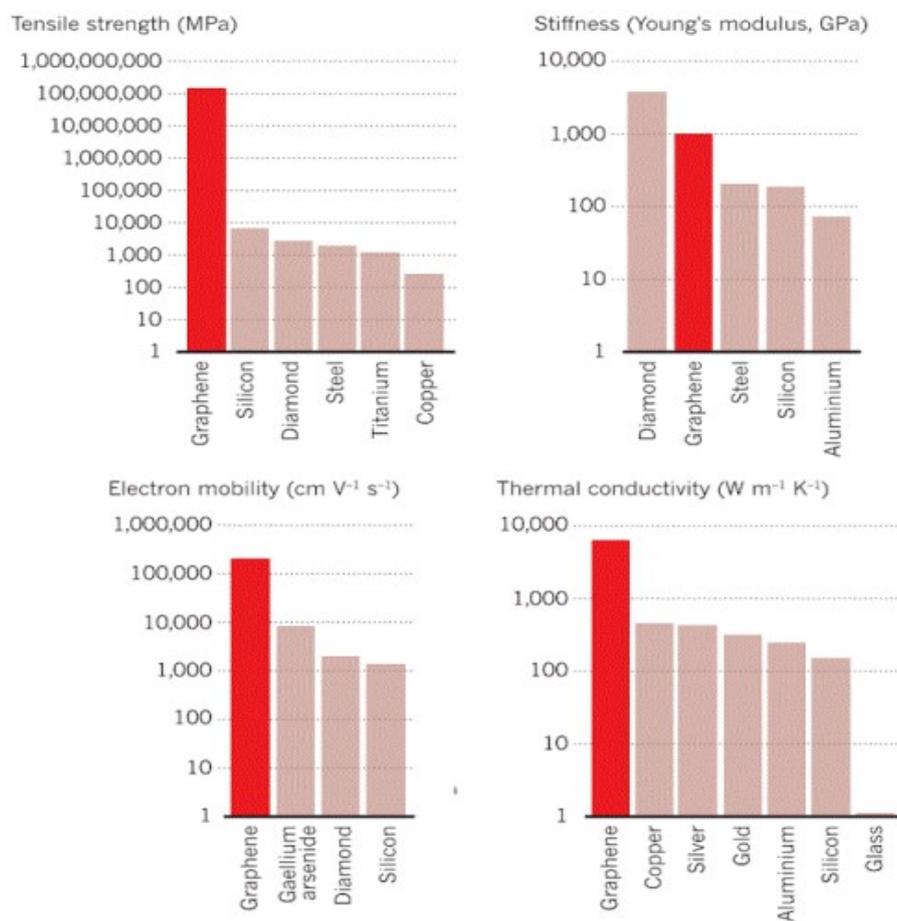


Figura 3.5 Proprietà del grafene a confronto con altri materiali

Capitolo 4: Applicazioni e Performance Sportiva

4.1 Potenzialità e possibilità

Il Grafene è tuttora considerato il materiale del futuro, in grado di racchiudere caratteristiche e proprietà che difficilmente caratterizzano un solo materiale.

Dunque, prima che un materiale possa essere realmente utilizzato deve soddisfare i requisiti di scalabilità necessari per entrare nel ciclo produttivo industriale. Ecco perché l'Unione Europea ha stanziato un sostanzioso fondo per finanziare un programma di ricerca chiamato "Graphene", che coinvolge numerosi gruppi di ricerca sparsi in 17 Paesi. Questo ci fa capire come il grafene può avere innumerevoli campi di applicazione, molti dei quali sono in via di sviluppo e molti altri ancora da scoprire. Le attività di ricerca e sviluppo sono suddivise per diversi ambiti come elettronica, ottica, batterie, medicina ecc.

È inevitabile che quando parliamo di innovazione tecnologica parliamo anche di sport e performance sportiva. Andiamo a vedere come il Grafene è entrato a far parte di questo mondo e di come va ad incrementare la performance sportiva.

4.2 Sci Alpino

4.2.1 Alto Livello

[15] È evidente come nello sci alpino di alto livello il materiale diventa parte fondamentale per l'aumento della performance. La tecnica stessa si evolve in funzione del materiale e quindi con lo sviluppo tecnologico. Facciamo una breve analisi dell'evoluzione tecnologica nel mondo dello sci e vedremo quanto il materiale ha influenzato la tecnica e quanto la tecnica ha determinato l'evoluzione del materiale. Come in tutti gli sport, i materiali nello sci giocano un ruolo importantissimo. Nella prima metà del secolo scorso si usavano gli sci in legno, quelli che agli occhi dei giovani di oggi potrebbero sembrare delle tavole da fissare ai piedi; col tempo si è passati ai materiali plastici combinati con metallo e legno fino ad arrivare alle moderne

composizioni, con legno, fibra di vetro, kevlar, titanio e altre componenti di ultima generazione.



Negli ultimi anni i materiali utilizzabili nella produzione degli sci sono molto più numerosi: si può spaziare dall'alluminio, al titanio, dalle fibre di vetro a quattro o sei tele, alle fibre di carbonio, per non parlare dell'ultima novità, il graphene.

Figura 4 Ted Ligety

[17] Grazie a questa innovazione, tutti gli sciatori hanno a disposizione un'ampia scelta di materiali e la possibilità di trovare gli sci ideali, come cuciti su misura da un sarto, in base alle loro misure e alle loro esigenze.

Andiamo a vedere più da vicino come è fatta la struttura dello sci:

Uno sci è schematicamente un'asta sottoposta ad un carico di flessione longitudinale e ad un carico di torsione trasversale.

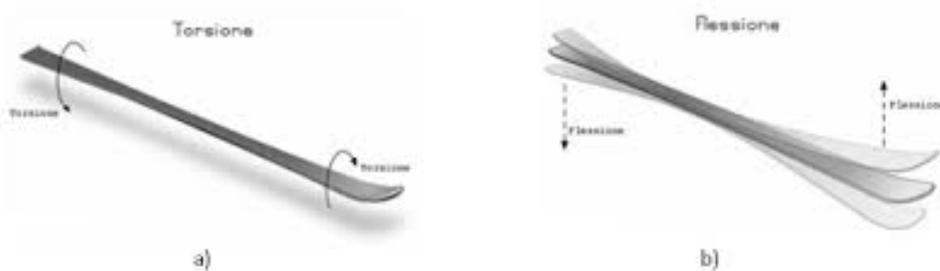


Figura 4.1 Carico di torsione e flessione sullo sci

Si induce la flessione quando lo sci viene caricato con un movimento di piegamento, definito "alto-basso", effettuato sulle ginocchia ad inizio curva, oppure quando si passa sopra una cunetta o ad un avvallamento. La torsione entra invece in gioco soprattutto

nelle diagonali e nelle curve condotte quando si applica la presa di spigolo sulla lamina dello sci.

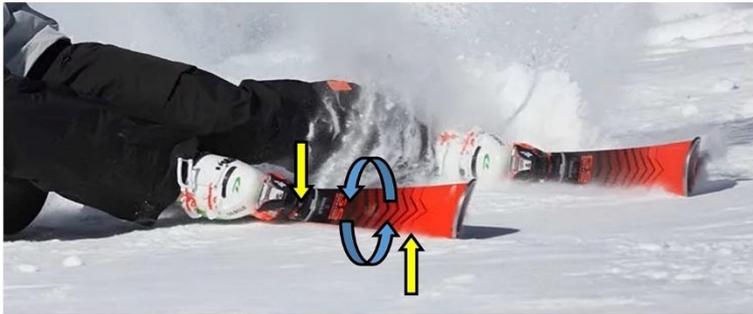


Figura 4.2 Fase di curva

La costruzione di uno sci di alto livello è quindi studiata dal progettista che deve definire le geometrie e la disposizione dei materiali che compongono lo sci, in base alle specifiche desiderate dall'atleta. I maggiori produttori dispongono di metodi di calcolo e misura delle deformazioni molto sofisticati.

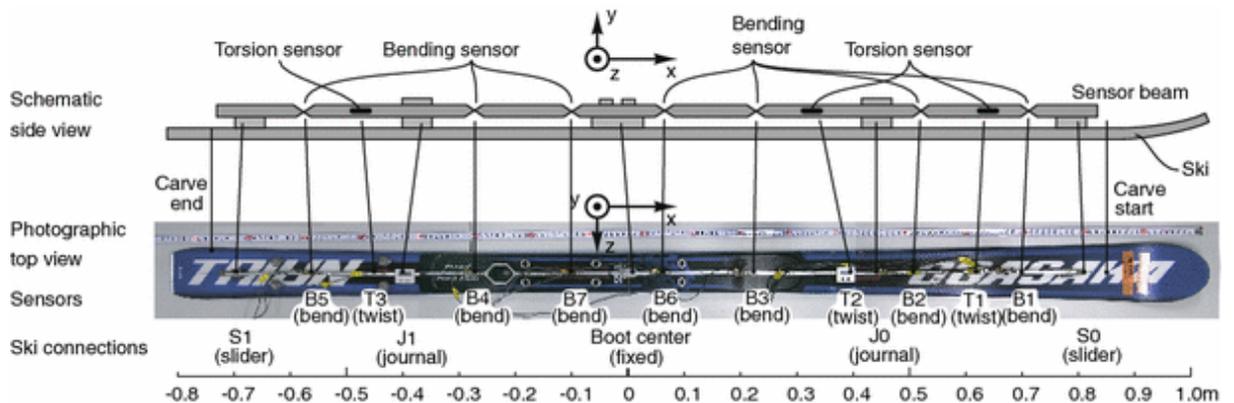


Figura 4.3 Schema di sensori applicati allo sci per valutare le deformazioni

Per ottenere tutte queste specifiche, la struttura dello sci è definita a “sandwich”, ossia tutti gli strati di materiale vengono sovrapposti per poi essere uniti tramite colle specifiche e pressati con apposite presse. Di base ci sono due fogli, uno superiore e uno inferiore che avvolgono il “core” che è l’anima dello sci (sempre in legno) e conferiscono l’elasticità flessionale, e in misura minore quella torsionale. Questi fogli sono generalmente realizzati in tessuti di carbonio, da preferire per la sua leggerezza, o kevlar, oppure in leghe metalliche come il Titanal (una speciale lega di alluminio

rinforzato da titanio) o leghe di titanio. I compositi di carbonio sono forniti sotto forma di fogli, o nastri, dove le fibre (del tipo lungo) sono intrecciate tra loro a 0° - 90° (per conferire resistenza bi-assiale) oppure a 0° - 45° - 90° (resistenza tri-assiale), o secondo trame più complesse, poi inglobate in una matrice di resina epossidica e infine sottoposte a cicli di polimerizzazione in forno o autoclave. Le caratteristiche meccaniche del composito possono essere definite a piacere dal progettista, variando la tipologia di fibre e della matrice, la percentuale di fibre e di matrice, la trama, e il processo di polimerizzazione del composito (temperatura e durata del processo, eventualmente sotto vuoto in autoclave).



Figura 4.4 Foglio in composito di carbonio

Le fibre di carbonio sono dunque un materiale straordinario per la costruzione dello sci, ma negli ultimi anni è stato introdotto anche il grafene grazie alle sue spettacolari proprietà. Dal 2016 Head ha cominciato ad utilizzare grafene nella produzione di sci di Coppa del Mondo.

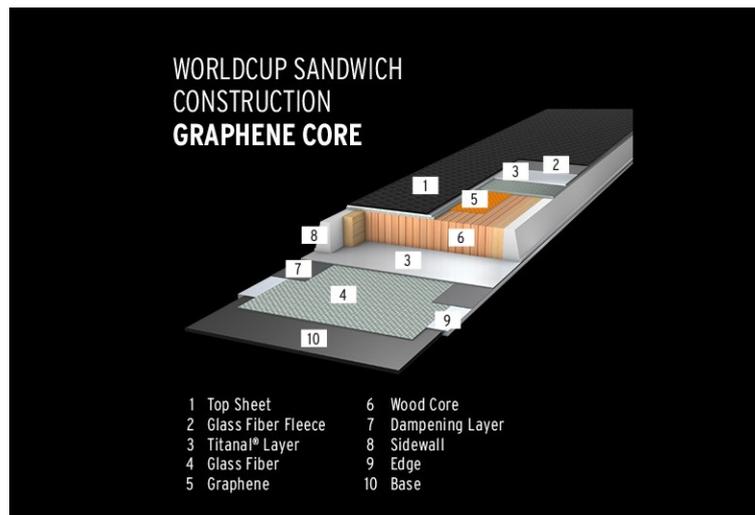


Figura 4.5 Struttura worldcup con grafene

L'azienda afferma che la costruzione Graphene WC sandwich Cap è sviluppata utilizzando il materiale più sofisticato al mondo. Presenta un mix equilibrato di Graphene e strati di titanale e combina agilità e reattività per performance incredibili, sviluppata direttamente dagli ingegneri del reparto ricerca e sviluppo in stretta collaborazione con gli atleti. Un'altra tecnologia a base di grafene che hanno integrato nei loro prodotti di alta gamma è la EMC-Energy Management Circuit, ovvero un innovativo circuito elettronico integrato nello sci che riduce le vibrazioni e conferisce maggiore stabilità e tenuta in curva. Questo sistema viene posizionato in punta e in coda, dove gli elementi ceramici piezoelettrici del sistema convertono l'energia meccanica delle vibrazioni in energia elettrica, la quale viene dissipata mediante dei resistori conferendo allo sci un comportamento molto più stabile. L'elettricità generata dalle fibre piezoelettriche scorre in un circuito composto da strati di grafene e carbonio e da resistenze integrati nella costruzione dello sci. Il circuito quindi convoglia l'energia elettrica alle resistenze, assicurando stabilità e tenuta su tutto l'arco di curva.

[19] Grazie a tutta questa innovazione, negli ultimi mondiali iridati Head ha conquistato piuttosto nettamente il medagliere. Sia per numero di medaglie d'oro che per il totale: quattro metalli preziosi e ben 13 in totale con 3 argenti e 6 bronzi.



Figura 4.6 Atleti Head sul podio ai mondiali di sci alpino Meribel 2023

4.2.2 Livello Performance

Anche a livello amatoriale, con l'avvenimento del carving, ogni azienda di attrezzature per sci alpino insegue l'innovazione, che passa soprattutto dai materiali e dall'impatto dell'attrezzo sulla sciata: «Dal grafene al carbonio le aziende stanno cercando di realizzare attrezzature sempre più leggere che garantiscano eguale resa. In generale gli sci più moderni consentono di sciare meglio a qualsiasi livello. Lo fanno per esempio con un nuovo sistema che permette di inclinarli maggiormente e “sentire” di più le lamine: così chiunque si sentirà più capace, con il minor sforzo».

[18] Per la stagione invernale 2016, Head ha completamente rivisto la mitica linea Head Supershape inserendo anche nella gamma Performance il rivoluzionario grafene, materiale capace di consentire una redistribuzione delle masse all'interno dello sci. Grazie al grafene, posizionato nella parte centrale dello sci, è stato possibile spostare il legno nelle estremità aumentando così il punto di contatto neve-sci per una deformazione più facile e naturale. Questi sci hanno una struttura completamente nuova, con un'anima in legno molto più larga. Grazie alla leggerezza del grafene, Head è in grado di utilizzare una lastra di alluminio più spessa e più larga, che ricopre tutto lo sci, assicurando maggiore reattività e potenza. Avendo posizionato il grafene al centro dello

sci, Head è riuscita a ridurre lo spessore della parte centrale e distribuire più materiale nella punta e nella coda, creando così uno sci caratterizzato da una deformazione equilibrata e più maneggevole, garantendo una tenuta in curva perfetta. Inoltre, questa distribuzione delle masse permette un ingresso curva preciso e un'accelerazione in uscita curva mai visti prima. Grazie alla punta e alla coda più spessa, la casa ha potuto progettare delle geometrie specifiche per i quattro modelli della linea Supershape che, grazie alla più rapida presa di spigolo, risultano più facili sin dalle prime fasi della curva.



Figura 4.7 Head super shape con tecnologia al grafene

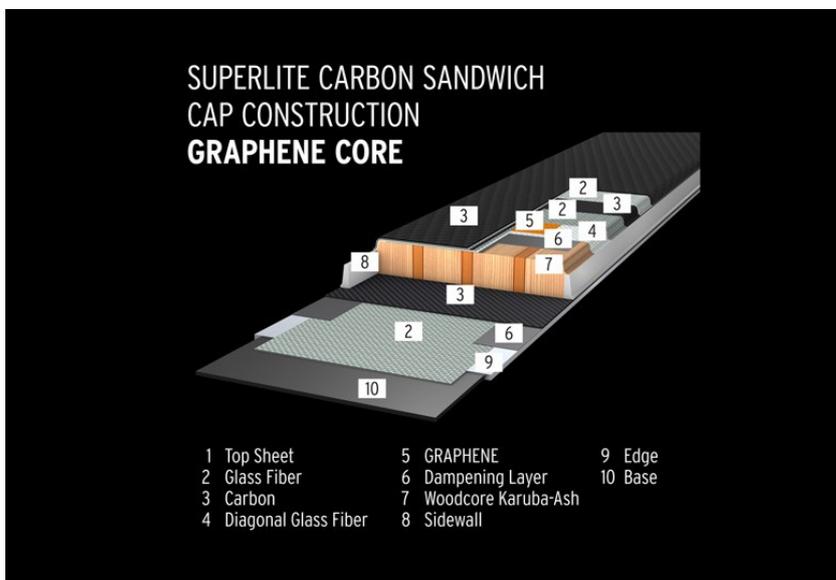


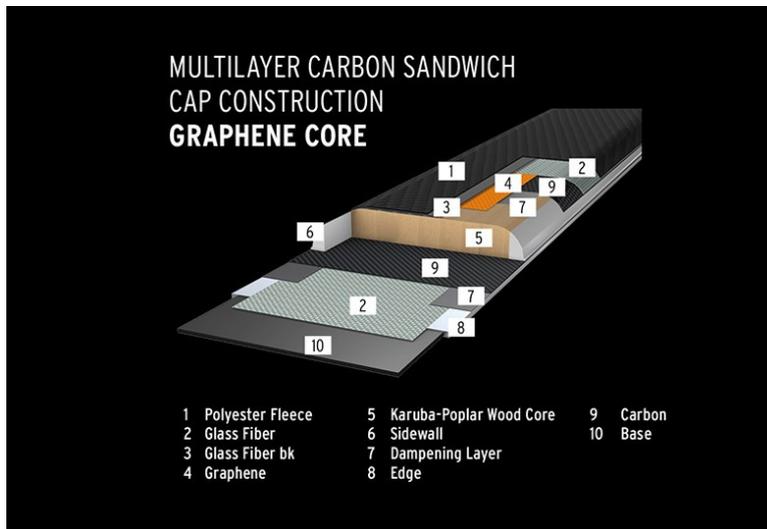
Figura 4.8 Costruzione Superlight

Combinando i materiali più leggeri e resistenti sono riusciti a sviluppare un prodotto stabile, reattivo e leggero. Il legno di Karuba unito a carbonio e Graphene garantisce

altissimi livelli di performance. L'equilibrio perfetto tra prestazioni e leggerezza. Grazie alle proprietà uniche del Graphene, la costruzione Superlite Sandwich Cap vede una riduzione dei materiali utilizzati con un incremento della reattività per cambi spigoli ancora più immediati.

4.2.3 Freeride e Touring

Figura 4.9 Costruzione Freeride



Ecco che l'utilizzo del grafene diventa fondamentale per il mondo del freeride touring dove è richiesta leggerezza per la salita e rigidità per la discesa. La costruzione Super Light Sandwich consente, grazie all'utilizzo del Graphene,

due strati di carbonio e la rimozione dello strato superficiale con uno strato di poliestere, così da realizzare lo sci da freeride più leggero al mondo.

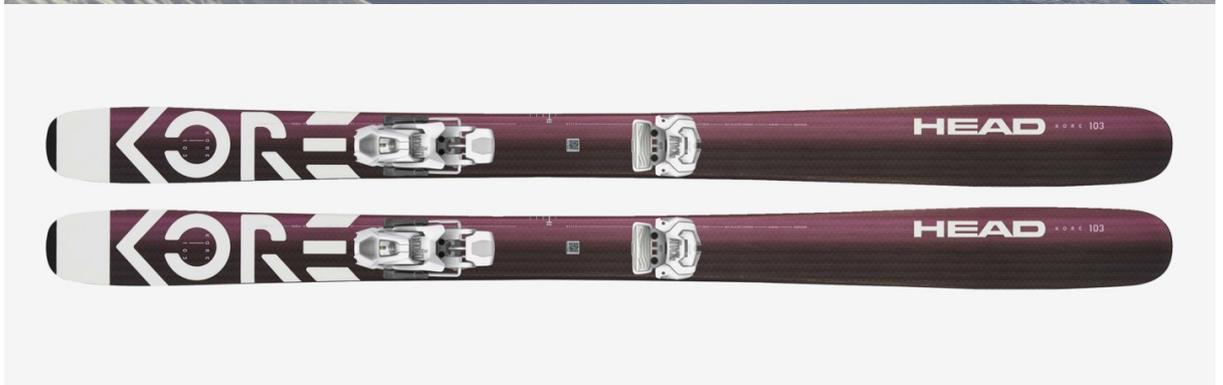




Figura 4.10 Mondo freeride e touring

4.2.4 Scarponi

[19] All' ISPO 2018 di Monaco, Head ha introdotto per la prima volta il grafene in una linea di scarponi. In particolare, nella linea Nexo, gli scarponi dedicati a sciatori di livello intermedio che cercano leggerezza e performance. Il grafene è stato inserito nello scafo consentendo di assottigliare le plastiche dello scarpone e ottenere una maggiore leggerezza. Per garantire migliore performance è stata inserita la struttura particolare per evitare la deformazione dello scarpone in piega di curva.

Altre caratteristiche sono quella dei ganci super leggeri che contribuiscono a diminuire il peso, la possibilità di termoformare lo scafo e inoltre la scarpetta, che presenta un nuovo sistema di personalizzazione ed è stata irrobustita nei punti cruciali.



Figura 4.11 Scarpone Nexo



Figura 4.12 Scarpone Kore con sistema walk

Materiali innovativi consentono di stravolgere i metodi costruttivi. Integrando materiali avanzati è stato possibile sperimentare nuove geometrie che hanno portato a sci facili ma performanti.

4.3 Abbigliamento sportivo

Grazie alle sue proprietà termiche e grazie alla sua flessibilità il grafene sta rivoluzionando anche il settore dell'abbigliamento. Leader nel settore, Colmar è stata la prima azienda del tessile a crederci, integrando il prezioso materiale nanotech nell'abbigliamento sportivo. [20] La collaborazione tra Directa Plus, il più grande produttore e fornitore di prodotti a base di grafene in Italia, e Colmar ha portato al lancio della loro nuova collezione di indumenti sportivi contenenti Grafene G+, con

l'obiettivo di migliorare sempre di più la performance degli atleti.



Figura 4.13 Giacca Colmar con integrato grafene G+ prodotto da Directa Plus

La collaborazione con Directa Plus ha dato vita a un modello di giacca a vento, una tuta da gara (usata dalla nazionale francese di sci alpino) e due modelli di intimo tecnico. La caratteristica più sorprendente di questi capi è la capacità di agire da filtro tra il corpo e l'ambiente esterno, assicurando la temperatura ideale a chi li indossa. Un tessuto intelligente che permette un comfort *taylor made*. Il calore prodotto dal corpo viene disperso in presenza di climi caldi e conservato e distribuito uniformemente in climi freddi. Il livello di confort che si riesce a raggiungere è elevatissimo grazie alle proprietà di conducibilità termica del grafene G+ nel piano e non attraverso il tessuto. La speciale stampa esagonale in Grafene G+ trasferisce il calore generato dal corpo dalle parti più calde a quelle più fredde, uniformando il calore e garantendo inoltre una rapida asciugatura del tessuto. Essendo inoltre un tessuto antistatico, G+ consente la rapida dispersione degli accumuli di carica elettrostatica e grazie al suo trattamento batteriostatico, impedisce il proliferare dei batteri e la formazione dei cattivi odori.

La giacca a vento Technologic G+ è stata premiata all'ISPO di Monaco come Gold Winner. In questo capo particolare, il grafene è stampato sull'imbottitura in ovatta. Altri modelli invece, il G+ viene impiegato nella fodera o addirittura viene integrato nella innovativa membrana esterna rendendola impermeabile, traspirante e con caratteristiche di conducibilità termica uniche.



Colmar ha sfruttato la collaborazione con il Politecnico di Milano per migliorare l'integrazione tra il tessuto e il grafene. Il reparto corse ha quindi incluso le proprietà tecnologiche del G+ nella tuta da gara in dotazione alla nazionale francese di sci alpino. Le tute sono poi state sviluppate su misura per ogni atleta della nazionale, adattandole a ogni singola costituzione corporea offrendo il massimo della vestibilità e dell'ergonomia, sfruttandone il massimo potenziale. L'utilizzo del grafene nello strato esterno delle tute permette di ridurre l'attrito con l'aria e l'acqua, aumentando la velocità degli atleti.

Figura 4.14 Tuta da gara Nazionale Francese

Si basti pensare che le gare si vincono sul filo dei centesimi. Ogni minimo dettaglio quindi fa la differenza; storica rimane la tripletta nello slalom gigante ai campionati del mondo di St.Moritz nel 2016 di atleti francesi, tutti equipaggiati con tute Colmar con tecnologia al grafene.



Figura 4.15 Storica tripletta francese con tute al grafene

4.3.1 Sportswear

[21] Nel 2017 Deewear ha lanciato la prima collezione di abbigliamento sportivo a compressione D-ONE, che combina per la prima volta le incredibili proprietà del Graphene G+ di Directa Plus col tessuto posturale compressivo, che offre un comfort di livello superiore. Il tessuto è di tipo aderente a compressione posturale, che favorisce la circolazione sanguinea e l'ossigenazione dei tessuti muscolari. Riesce inoltre a migliorare la postura dell'atleta avendo una funzione di supporto strutturale. Le nano



piastrelle di grafene G+ vengono applicate allo strato intermedio del tessuto consentendo di realizzare un circuito termico che dà al tessuto una capacità di conduzione e dissipazione, cioè di trasferire il calore dalle zone più calde del circuito a quelle più fredde e dunque un comfort maggiore in ambienti caldi o mentre si pratica attività sportiva.

Figura 4.16 Tessuto contenente grafene

[22] Directa Plus ha inoltre adottato questa tecnologia per realizzare la linea di abbigliamento sportivo super tecnologica «Cosmic Collection». Il brevetto G+ è stato poi usato anche da altre aziende, come il produttore di abbigliamento tecnico Alfredo

Grassi che l'ha inclusa nella realizzazione di divise per i Vigili del fuoco [23].



Figura 4.17 Divisa vigili del fuoco

[23] Altra azienda all'avanguardia è l'italiana Finisseur, che con la sua giacca PRO RECE GRAPHENE, sostiene di avere il top della membrana disponibile sul mercato per quanto riguarda l'abbigliamento da bici. La membrana è formata da un tessuto a 3 strati,

altamente idrofobica e traspirante, combinata all' interno con un tessuto in fibra di grafene.

4.3.2 Abbigliamento sanitario

Una delle caratteristiche del grafene che ha suscitato più interesse, alla luce della pandemia di Covid-19, è la sua capacità antibatterica antivirale. Applicare il grafene nella filiera tessile consente di produrre capi che contrastano i batteri, senza andare ad alterare la naturale composizione dei tessuti, anzi, rendendoli addirittura più resistenti all' usura e ai lavaggi. Ecco che il grafene oltre ad essere apprezzato nella produzione di abbigliamento sportivo, potrebbe entrare a far parte della moda di tutti i giorni. L'innovazione tessile potrà inoltre fornire supporto in ambito medico, producendo camici per infermieri e personale medico, che consentiranno di lavorare in sicurezza.

4.4 Altri sport

4.4.1 Tennis

All'inizio del 2013, Head ha rivoluzionato il settore introducendo per la prima volta il grafene per produrre una nuova linea di racchette da tennis. Questa nuova produzione permetteva di ridistribuire le masse all' interno della racchetta per ottenere un incremento delle performance. La parte centrale del telaio è stata alleggerita e allo stesso tempo è risultata implementata la stabilità, rigidità e resistenza del prodotto;



spostando parte della massa in punta e in coda si ottiene una grande maneggevolezza e una straordinaria potenza nel colpire la palla. In termini di performance pura, parliamo di un minor sforzo da parte dell'atleta a favore di colpi più potenti.

Figura 4.18 Racchetta da tennis con grafene

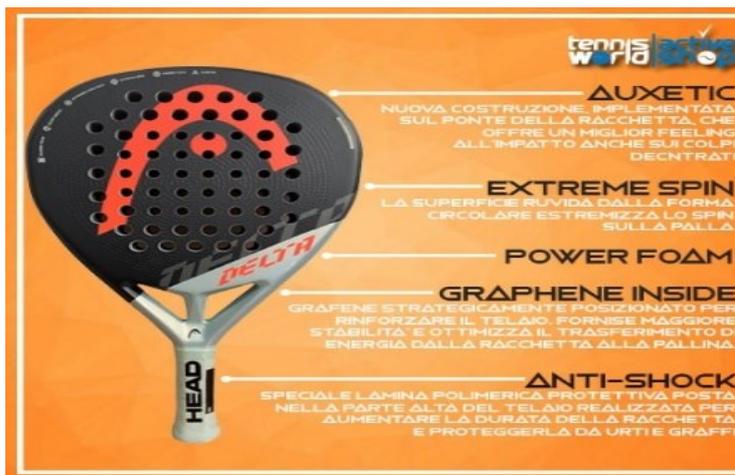


Figura 4.19 Racchetta da Padel con grafene posizionato per rinforzare il telaio, fornire maggiore stabilità e ottimizza il trasferimento di energia dalla racchetta alla pallina

4.4.2Ciclismo

[24] Due aziende italiane come Vittoria e Directa Plus, hanno cominciato a collaborare per applicare il grafene nella produzione di ruote e coperture da bici. Gli studi rivelano che l'integrazione del grafene nelle ruote in carbonio consente di aumentare la rigidità laterale fino al 50%, con la conseguente maggior precisione di guida e resistenza agli urti, oltre ad un minor peso complessivo e una maggiore dissipazione del calore durante la fase di frenata. Questa nuova tecnologia e metodo di produzione hanno cambiato radicalmente anche le coperture, sia per bici da strada che mtb. (In Figura 4.20 Copertone Vittoria). [25] Lo sviluppo ha fatto sì che si sia riusciti a mescolare nanoparticelle di grafene direttamente con la miscela della gomma, migliorando aderenza e deformazione dei copertoni, oltre che le prestazioni a diverse temperature e la resistenza a tagli e forature. Un'analisi al microscopio effettuata presso il Politecnico di Torino ha messo in luce che le nanoparticelle di grafene rimangono più addensate rendendo la gomma più compatta e quindi diminuendo l'attrito con il terreno. In fase di deformazione della gomma in frenata, accelerazione o in curva, le particelle si dispongono direzionalmente favorendo grip e trazione con una velocità di ritorno alla

posizione iniziale molto elevata. Oltre a ridurre il peso, il copertone risulta essere meno soggetto a usura di circa 1/3. Ruote e coperture a base di grafene ci consentono di esaltare le proprietà del prodotto senza scendere a compromessi ed assicurarsi il top della performance.



Figura 4.20 Copertone Vittoria mtb

Attre ditte hanno cominciato ad integrare il grafene nei caschi da ciclismo, migliorandone le caratteristiche di sicurezza, e anche di scarpe che risultano leggere, ergonomiche e molto durevoli grazie alle proprietà del grafene.

4.4.3 Running

Figura 4.21 Scarpa Trail



La società britannica Inov-8 ha recentemente lanciato sul mercato una linea di scarpe per il trail running con suola a base di grafene. In stretta collaborazione con l'università di Manchester, la società ha messo a punto la serie di scarpe G, con calzature caratterizzate da una base più solida, elastica e resistente all'usura. Questa linea è dedicata agli appassionati di corsa estrema in ambiente esterno. Non è stato facile combinare elasticità e robustezza, ma hanno messo a punto una formula materica in cui il grafene può mescolarsi con la gomma delle scarpe senza perdere le sue proprietà. La

ricerca di elevate resistenza e flessibilità e quindi la messa a punto di nuove formule per qualsiasi tipo di calzatura sportiva, ha interessato recentemente anche altre aziende.

4.5 Altre applicazioni in campo energetico

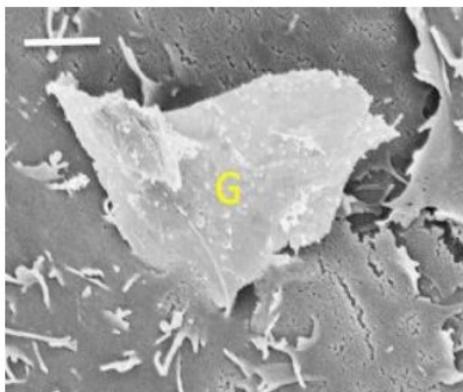
Andiamo a vedere in modo rapido alcune delle applicazioni innovative del grafene in diversi ambiti al di fuori di quello sportivo.

[30] In campo energetico attualmente si sta studiando il suo utilizzo nei pannelli solari per aumentarne l'efficienza. Secondo alcuni studi il grafene potenzialmente potrebbe aumentare fino al 50% la conducibilità di ogni singolo pannello e il suo utilizzo va considerato a stretto contatto coi moduli al silicio. Il modulo viene trattato con un colorante al biossido di titanio e diventa il semiconduttore del sistema che attiva l'effetto fotovoltaico. Aumentando la giusta quantità di grafene al biossido, la sua capacità conduttiva aumenta notevolmente. Inoltre, si stanno studiando anche dei modi per produrre una speciale vernice che viene applicata all'esterno di edifici che riesca a produrre energia elettrica assorbendo la luce del sole. Questa nuova tecnologia potrebbe far evolvere non solo il settore del fotovoltaico ma anche il mondo della tecnologia con la possibilità di creare dispositivi in grado di auto ricaricarsi autonomamente. Altra frontiera è quella della produzione di batterie al grafene che puntano a ridurre i tempi di ricarica e ad aumentarne l'autonomia.[31] Alcuni studi dimostrano come queste batterie innovative non presentano evidenti segni di degrado dopo un alto numero di cicli di ricarica, cosa che invece caratterizza le batterie a ioni di litio. Batterie più durature significa avere uno smaltimento più eco sostenibile. Se ci proiettiamo nella transizione ecologica che ci dovrà essere nei prossimi anni si capisce quanto potrebbe essere utile l'utilizzo delle nuove batterie al grafene. La stessa auto elettrica, infatti, pur riducendo drasticamente le emissioni, crea un enorme problema attualmente non risolto: lo smaltimento sostenibile delle batterie. È quindi di primaria importanza investire su tecnologie più efficienti e sicure per lo smantellamento delle batterie delle auto elettriche e il riciclaggio pulito delle loro componenti oppure trovare degli elementi alternativi che possano sostituire i componenti inquinanti racchiusi nelle batterie a litio. Il grafene potrebbe rappresentare una valida soluzione. Ad oggi il limite rimane ancora quello tecnologico ed economico, il grafene costa circa 60 volte di più dei materiali utilizzati oggi per le batterie.

Capitolo 5: Pericolosità

5.1 Rischi tossici del grafene

[26] Come abbiamo già detto in precedenza “non è tutto oro ciò che luccica”. Seppur questo materiale risulta essere eccezionale sotto molti punti di vista, bisogna tener conto della sua pericolosità. Sono tuttora in fase di studio alcune problematiche che riguardano la tossicità nei confronti dell’uomo. Secondo alcuni studi effettuati alla Brown University il grafene risulta essere in grado di penetrare nelle cellule e danneggiarle in maniera grave. La fase più rischiosa è la produzione, dove l’operatore è più esposto alle particelle nanometriche. Anche il consumatore finale risulta potenzialmente a rischio, in quanto non è noto cosa potrebbe accadere se si rompesse un componente a base di grafene e quest’ultimo venisse inalato. I ricercatori hanno analizzato quali potrebbero essere gli effetti di frammenti di grafene sui tessuti umani, dimostrando in modo certo come particelle grandi anche 10nm riescono a penetrare nelle cellule.



Il rischio più imminente è legato all’ inalazione ma anche al contatto diretto soprattutto con occhi e pelle. Questo fenomeno è da tenere in forte considerazione e dovrà essere valutato e studiato con estrema attenzione se questo materiale inizierà a far parte della vita di tutti i giorni tra poco tempo, evitando di rivivere quello già successo con l’eternit.

Figura 5.1 Grafene penetrato in una cellula

[28] In Italia c’è una azienda che ha effettuato dei test tossicologici per verificarne la non tossicità e la non citotossicità (capacità di danneggiare una cellula) sul grafene prodotto nello stabilimento di Directa Plus: la Farcoderm, una società del pavese specializzata nella valutazione della sicurezza e della tollerabilità di prodotti e sostanze.

Le analisi tossicologiche sui prodotti testati hanno dato esito negativo, confermando che non comportano rischi per la salute. Staremo a vedere.

In campo ambientale è stato riscontrato che l'ossido di grafene potrebbe diventare tossico per l'uomo per la sua mobilità in acqua. Queste particelle se scaricate in acqua possono restare integre e mobili, minacciando l'ambiente e la salute. Bisogna quindi studiare e garantire sistemi di smaltimento che evitino l'immissione di particelle potenzialmente pericolose in ambiente esterno.

CONCLUSIONI

Come abbiamo visto in questo elaborato, il grafene sembra essere determinante nel migliorare la performance sportiva, soprattutto negli sport dove il materiale è fondamentale per arrivare alla vittoria. Nello specifico, per lo sci alpino di alto livello abbiamo visto come le gare si vincano sul filo dei centesimi, il che è davvero sorprendente per uno sport dove la quantità di variabili in gioco è molto elevata. Miglioramenti in termini di performance, ma anche di comfort e sicurezza, sono in continuo sviluppo. Abbiamo visto come Head sia leader nello sviluppo di attrezzature a base di grafene a livello mondiale. Seppure il grafene risulti ancora molto costoso, notiamo come i prodotti Head abbiano un costo equiparabile ai prodotti di marchi concorrenti; questo fa supporre che Head abbia sviluppato dei metodi di produzione avanzati e che la quantità di grafene utilizzata sia minima. Da questo si evince che anche una piccola quantità di grafene risulta aumentare notevolmente le proprietà del prodotto finale.

Durante le mie ricerche ho cercato di contattare i produttori per approfondire l'argomento, ma ho trovato enormi difficoltà nell'averne risposte relativamente alle ricerche in corso all'interno dell'azienda. Ricerca e sviluppo su questo materiale sembrano correre velocemente verso il futuro, i produttori cercano di sviluppare materiali sempre più innovativi e all'avanguardia, per cui è probabile che vedremo sempre più prodotti rinforzati con grafene in ambito sportivo. Come in altri settori, anche nello sport le tecnologie usate per le prestazioni ad alto livello arrivano poi ad interessare una vasta gamma di prodotti rivolti all'utente medio, ecco così che il grafene potrà entrare a far parte della vita di ogni appassionato di sport. Quello sportivo è solo uno dei tanti settori dove il grafene sta diventando fondamentale; quindi, è prevedibile un continuo sviluppo su questo materiale e sulla sua sostenibilità. In Italia, aziende come Victoria e Colmar sono realtà leader nella costante evoluzione e sviluppo dei propri prodotti e vengono supportate da un'altra eccellenza italiana come Directa Plus, focalizzata nella continua ricerca di applicazioni del grafene.

Bibliografia/ Sitografia

- [1] Edward L. Wolf, “Grafene”
- [2] R. Dimitri, “Grafene: Proprietà, Sintesi e Applicazioni”
- [3] “Grafene: produzione, applicazioni e prezzo di un nuovo materiale”, da architettura ecosostenibile
- [4] C. Canova, “Grafene: proprietà, sintesi e applicazioni”
- [5] M. Cardoni, “Grafene: proprietà, sintesi e trasferimento con il ciclododecano”
- [6] S. Marin, “Il Grafene: un materiale innovativo dalle innumerevoli potenzialità”
- [7] A. H. Castro Neto: “The electronic properties of graphene”. *Reviews of Modern Physics* 81, 109 (2009).
- [8] S. Manchala, “Novel and Highly Efficient Strategy for the Green Synthesis of Soluble Graphene by Aqueous Polyphenol Extracts of Eucalyptus Bark and Its Applications in High-Performance Supercapacitors”
- [9] A. K. Geim e A. H. MacDonald, “Graphene: Exploring carbon flatland”
- [10] F. Colangelo, “Proprietà meccaniche del grafene sospeso analizzate mediante microscopio a scansione di sonda”
- [11] F. Idone, “Graphene: rivoluzione per gli sci Head”, da “sportfair”, 5\10\2016
- [12] M. Scandola, “Le proprietà del grafene” da “CNR Graphene Factory” 9\11\2015
- [13] F. Fedi, “Fullereni, nanotubi e grafene”
- [14] F. Ebrahimi e E. Heidari, “A review of modeling, synthesis and properties of graphene” 25/11/2015
- [15] M. Di Marco, “Tecnologia: come si sono evoluti gli sci” da *Sciaremag* 9\12\2016
- [16] “L'evoluzione dello slalom da Reinatter a Matt passando per Tomba: come cambiano materiali e angoli” da *Eurosport* 1\2\2017
- [17] “L'utilizzo del carbonio negli sci e snowboard” da *Avalco Travel* 2021
- [18] M. Caminada, “Il grafene rivoluziona gli sci Head Performance” da “l'inviato speciale”, 04/10/2016

- [19] M. Di Marco, “Ai mondiali la sfida tra i marchi dello sci la vince Head”, da Sciaremag 23\03\2023
- [20] “Directa Plus and Colmar launch world’s first graphene-enhanced sportswear”, Directa Plus press release, 26/01/2016
- [21] “Deewear launches D-ONE, the first collection of compression sportswear incorporating Directa’s G+ graphene”, Directa Plus press release, 23/05/2017
- [22] “Directa Plus and Colmar launch second collection of graphene-enhanced sportswear”, Directa Plus press release, 06/02/2017
- [23] “Grafene e workwear: un binomio vincente” da Grassi news, 21\12\2021
- [24] S. Doria, “Vittoria, Directa Plus e lo strabiliante Grafene”, tech-cycling, 28/10/2015
- [25] “Vittoria: un innovazione chiamata Grafene” da “mtb magazine”, 28/10/2015
- [26] V. Porcu, “Il grafene è tossico, attacca le cellule e le danneggia”, 16/07/2013.
- [27] “Il grafene è tossico?” da “Scienza in rete”, 02/05/2014
- [28] “Inaugurato il primo impianto per la produzione di grafene in Italia”, 2014, n. 621, pag. 58;
- [29] S.Casaluci, M. Gemmi, V. Pellegrini, A.Di Carloa, F. Bonaccorso, “Graphene-based large area dye-sensitized solar cell modules. Nanoscale”, 10\08\2016
- [30] “Batterie al grafene: una soluzione sostenibile per lo sviluppo della mobilità elettrica” da “circular mobility” 22\06\2022

SITI

- www.head.com
- www.directa-plus.com
- www.mtb-magazine.com
- www.avalcotravel.com
- www.vittoria.com