



Università degli Studi di Ferrara

DOTTORATO DI RICERCA IN
"SCIENZE DELL'INGEGNERIA"

CICLO XXII

COORDINATORE Prof. Francesco Mollica

***VALORIZZAZIONE DEI PNEUMATICI FUORI USO (PFU) ATTRAVERSO IL
RECUPERO E RICICLAGGIO PER LA PRODUZIONE DI PRODOTTI INNOVATIVI***

Settore Scientifico Disciplinare ING/IND 22

Dottorando

Dott. Bergonzoni Marco

Tutore

Prof. Mollica Francesco

Anni 2007/2009

INDICE

Introduzione	5
1. LA GOMMA E IL PNEUMATICO	6
1.1 La storia e l'evoluzione della gomma	6
1.1.1. <i>Gomma naturale</i>	10
1.1.2. <i>Gomma sintetica</i>	14
1.1.3. <i>Produzione della gomma</i>	18
1.2 Il pneumatico	25
1.2.1 <i>Origini del pneumatico</i>	25
1.2.2 <i>Caratteristiche del pneumatico e fasi di produzione</i>	30
2. ASPETTI LEGISLATIVI E TECNICI PER IL RECUPERO DEL PFU	36
2.1. Aspetti legislativi.....	36
2.2. Analisi del mercato del PFU in Europa e in Italia.....	39
2.3. Valorizzazione del PFU e modalità di recupero.....	42
2.3.1 <i>Ricostruzione del pneumatico</i>	45
2.3.2 <i>Recupero di materia</i>	46
2.3.3 <i>Recupero energetico</i>	52
3. VALORIZZAZIONE DEL PFU PER APPLICAZIONI NEL CAMPO DELL'ISOLAMENTO ACUSTICO	56
3.1. Elementi di acustica in edilizia.....	56
3.1.1. <i>Il suono e la sorgente sonora</i>	56
3.1.2. <i>Livelli sonori e scale di misurazione</i>	57
3.1.3. <i>Assorbimento, Riflessione e Trasmissione del suono</i>	57
3.1.4. <i>Il suono in ambiente esterno ed interno: modalità di propagazione</i>	59
3.1.5. <i>Proprietà dei materiali fonoassorbenti</i>	60
3.2. Comportamento dei materiali rispetto all'isolamento acustico	61
3.2.1. <i>Proprietà dei materiali fonoisolanti correlate con le prestazioni acustiche</i>	63
3.2.2. <i>Tecniche costruttive per la riduzione del rumore di calpestio</i>	65
3.2.3. <i>Normativa ed accenni sui pavimenti galleggianti</i>	66
3.2.4. <i>La corretta progettazione ed esecuzione del pavimento galleggiante</i>	67
3.3. Prove sperimentali meccaniche e acustiche su miscela contenente granuli di PFU.....	69
3.3.1. <i>Prove meccaniche e modello numerico</i>	70
3.3.2. <i>Prove acustiche di laboratorio</i>	82
3.4. Conclusioni.....	91

4. APPLICAZIONI DEL PFU NELLA REALIZZAZIONI DI CAMPI IN ERBA SINTETICA	92
4.1. Storia e generalità dei campi in erba sintetica	92
4.2. Modalità costruttive di un campo in erba sintetica.....	96
4.3. Utilizzo di granuli di PFU quale materiale di intaso	105
4.3.1. Prove normate sui granuli	106
4.3.2. Aspetti sanitari e sulla salute derivanti da impiego di PFU	114
4.3.3. Stato della ricerca sui traumi nei campi sintetici	121
4.4. Realizzazione del campo da Rugby di Reggio Emilia	129
4.5. Conclusioni	132
5. UTILIZZO DEL PFU PER GLI ASFALTI MODIFICATI	134
5.1. Bitumi tradizionali e i bitumi modificati	134
5.1.1. Origine del bitume	134
5.1.2. Composizione chimica	134
5.1.3. Frazionamento del bitume e morfologia.....	136
5.2. Impiego stradale dei bitumi	138
5.2.1. La pavimentazione	138
5.2.2. Caratteristiche del legante.....	140
5.2.3. Metodi tradizionali di caratterizzazione fisica.....	141
5.3. I bitumi modificati (asphalt rubber).....	142
5.3.1. I bitumi modificati con SBS.....	142
5.3.2. Comportamento reologico dei bitumi	146
5.3.3. Processi di produzione del conglomerato con l'impiego di gomma.....	150
5.4. Indagine sperimentale su materiale asphalt rubber.....	151
5.4.1. Prelievo del materiale e preparazione dei campioni	151
5.4.2. Prove sperimentali di laboratorio sui campioni	155
5.5. Conclusioni	164
6. APPLICAZIONE DEL METODO LCA ALL'AZIENDA DI RECUPERO PNEUMATICI AMBRA AMBIENTE	166
6.1. La società Ambra Ambiente	166
6.2. LCA: Life Cycle Assessment	168
6.2.1. Che cos'è un LCA	168
6.2.2. La metodologia LCA	170
6.2.3. Strumenti software LCA: SimaPro 6.0.....	175
6.3. LCA applicato ad Ambra Ambiente.....	178
6.3.1. Analisi dell'inventario, degli impatti e interpretazione	178
6.3.2. LCIA di Ambra Ambiente	181

6.3.3. LCIA di Ambra Ambiente con recupero di materiali	188
6.4. Conclusioni	192
CONCLUSIONI.....	194
BIBLIOGRAFIA	196
<i>Ringraziamenti.....</i>	200

Introduzione

Obiettivo della presente attività di ricerca è stato quello di valorizzare, attraverso idonee forme di riutilizzo e recupero, i pneumatici fuori uso (PFU) al fine di realizzare prodotti tecnici innovativi a basso impatto ambientale. Tale ricerca si inserisce infatti in un contesto legislativo ben chiaro in quanto, con l'applicazione del nuovo Testo Unico Ambientale D.lgs 152/2006 e del D.lgs 36/2003 sulle discariche di rifiuti, non è più possibile smaltire i PFU in discarica. Con tale divieto, e considerato che fino ad oggi più del 65% del PFU aveva tale destinazione finale, si rende necessario e obbligatorio trovare idonee forme alternative di valorizzazioni delle ingenti quantità di PFU che ogni anno si producono. Ogni anno infatti in Europa vengono prodotti circa 3,2 milioni di tonnellate di PFU e, in Italia, il quantitativo raggiunge le 500 mila tonnellate. Solo attraverso un idoneo modello gestionale basato sul recupero e valorizzazione, supportato da un valido ed efficiente sistema di ricerca e sviluppo, è possibile riutilizzare il PFU in nuove mescole che garantiscano l'ottenimento di nuovi prodotti eco-compatibili poco impattanti sull'ambiente. Occorre inoltre evidenziare che, come tutte le attività, al fine di riuscire ad inserire sul mercato nuovi prodotti, risulta di fondamentale importanza garantire sia elevati standard tecnici di qualità, affidabilità e rispondenza alle normative di settore ma, soprattutto, essere competitivi anche sull'aspetto economico. Pertanto, solo attraverso una mirata analisi costi-benefici è possibile calibrare e orientare la ricerca laddove vi siano reali sbocchi di applicazione e successo di nuovi prodotti. In tale ottica l'attività di ricerca condotta si è sviluppata fundamentalmente sui seguenti aspetti: bitumi modificati con PFU, pannelli fonoisolanti per edilizia, campi da calcio/rugby in erba sintetica. In aggiunta è stato applicato il metodo LCA (Life Cycle Assessment) per la valutazione del ciclo di vita dei materiali prodotti dall'attività di recupero del PFU svolta dall'azienda Ambra Ambiente (Cotignola di Ravenna).



1. LA GOMMA E IL PNEUMATICO

1.1 La storia e l'evoluzione della gomma

Agli inizi dell'XI secolo la civiltà Maya e quella Azteca raccoglievano la linfa di una pianta, l'*Hevea Brasiliensis*, per farne oggetti diversi di culto o di svago. L'albero "*Hevea Brasiliensis*", è il caa-o-chu, detto anche albero che piange. Originario del Brasile si è diffuso anche in Asia, in particolare in Malesia e Nuova Guinea. La resina bianca sottoposta a riscaldamento dava origine ad una sostanza impermeabile e dotata di una certa elasticità.

Le palle di gomma che, ottenute per condensazione tramite un processo termico, venivano utilizzate in un "gioco" rituale, svolgevano un ruolo di rilevanza fondamentale nelle due società precolombiane. Nel 1493 Cristoforo Colombo porta in Europa i primi pezzi di gomma cruda.

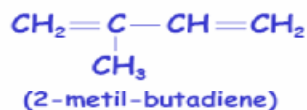
Bisogna però attendere il 1747 quando uno scienziato, Charles Marie de la Condamine (1701-1774), fornisce all'Accademia delle Scienze di Parigi informazioni preziose sia sulla provenienza e sulle proprietà del lattice di gomma, sia sul suo possibile uso per la fabbricazione di oggetti utili.

Nel 1763 nacque la gomma per cancellare grazie a Herissant e Macquer (Francia) e nel 1775 Edward Nairne e Joseph Priestley (Inghilterra) descrissero -"una sostanza eccellente per cancellare i segni di matita dalla carta, meglio delle briciole di pane"- . Fu così che dal verbo inglese to rub, ovvero cancellare, la gomma naturale divenne natural rubber. E' grazie all'utilizzo di questo materiale, che nel 1783 i fratelli Montgolfier realizzarono la prima esperienza di volo, dimostrando al mondo intero che un pallone di seta, ricoperto di gomma e contenente idrogeno, poteva volare.

Qualche anno dopo, nel 1797, Garnerin usò il primo paracadute. Tutto il XIX secolo si distinse per le molteplici scoperte riguardanti la gomma a partire da Himly, che nel 1836 effettuò la distillazione distruttiva della gomma naturale ottenendo la "faradina". Dal lattice naturale lavorato a caldo e masticato fra due cilindri dentati, quindi versato negli stampi, si potevano ottenere svariati oggetti che però mantenevano le loro caratteristiche elastiche soltanto a temperatura ambiente: con il caldo tendevano a sciogliersi nuovamente in lattice e col freddo ad irrigidirsi perdendo ogni elasticità. Nel 1805 Gough formulò "il concetto di elasticità",

Nel 1839 Goodyear scopre la vulcanizzazione, ovvero la capacità del lattice di gomma di unirsi allo zolfo ad alta temperatura e di trasformarsi in un prodotto dotato di proprietà meccaniche e fisiche superiori a quelle del caucciù allo stato grezzo e di migliorare notevolmente le sue proprietà elastiche. Nel 1860 Williams sottopose a pirolisi la gomma naturale, isolando per distillazione a 37-38°C ciò che battezzò col nome di isoprene (p.e. = 34°C).

La giusta formula dell'isoprene si trovò in seguito nel C_5H_8 :



Nel 1875 il chimico francese Bouchardat scoprì che l'isoprene, per azione dell'acido cloridrico, si trasforma in un polimero solido analogo alla NR (detto "poliprene" da Weber); si chiarì quindi maggiormente la natura chimica della NR, avvicinandosi ad una sua produzione industriale.

A fine secolo il Brasile aveva il monopolio della produzione della gomma, si ha in questo periodo la nascita dell'industria dei polimeri in Europa e negli Stati Uniti, basata sulla trasformazione di macromolecole di origine naturale (caucciù e cellulosa), che mirava ad ottenere nuovi materiali per applicazioni innovative su larga scala e a minor costo rispetto ai materiali esistenti in natura.

Da quel momento la crescente applicazione industriale del nuovo materiale e gli interessi degli europei in Estremo Oriente spinsero gli inglesi a trapiantare i semi della pianta (*Hevea Brasiliensis*) dall'Amazzonia a Ceylon, e a razionalizzare la cultura delle piantagioni e la raccolta del lattice (H. Wickam, 1876; H. Ridley, 1888) in una vasta area che comprendeva le Indie Orientali Olandesi, Sumatra, Malacca ecc. (Fig. 1.1).

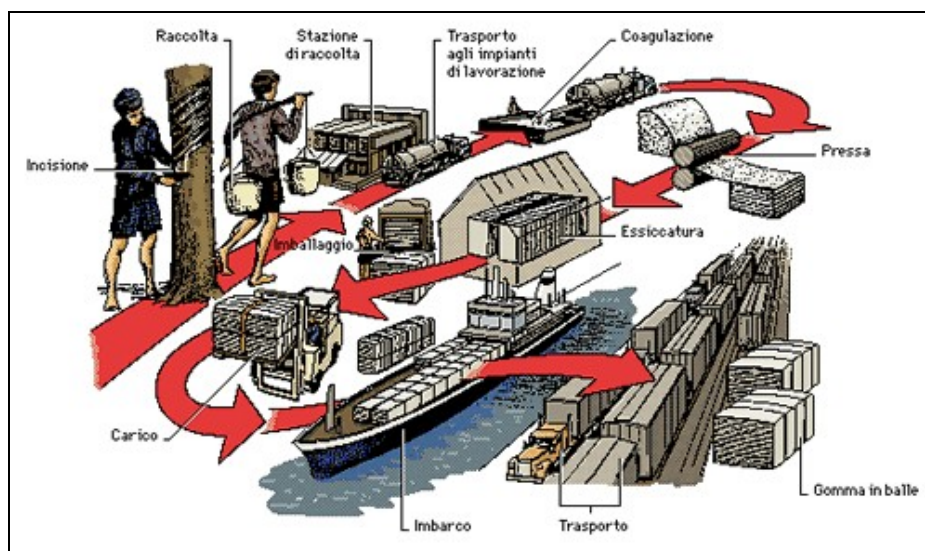


Fig. 1.1 - Schema semplificato del processo di produzione della gomma

In Gran Bretagna nel 1846 la produzione di gomma piena influenzò l'invenzione del pneumatico: l'intuizione fu di John Dunlop, un veterinario che nel costruire una bicicletta al figlio, progettò il primo pneumatico: il brevetto arrivò nel 1888. Solo due anni più tardi, Welch brevettò il pneumatico staccabile dalla ruota. Con la scoperta del petrolio negli Stati Uniti (1859) e la fabbricazione del motore a scoppio (1885) iniziò alla fine del secolo scorso la motorizzazione, con conseguente richiesta di grandi quantitativi di gomma naturale.

Il XX secolo diede vita a numerose esperienze riguardanti la microstruttura della gomma.

A seguito delle ricerche di Faraday, che nel 1826 aveva attribuito alla gomma naturale la formula $(C_5H_8)_x$, e di Williams, che nel 1860 aveva individuato nell'isoprene (C_5H_8) il costituente della gomma naturale, Tilden ottenne nel 1884 un elastomero identico alla gomma naturale partendo dall'isoprene. In particolare:

- 1915: Produzione della gomma sintetica dal 2,3-dimetilbutadiene.
- 1926: l'industria tedesca riprese gli studi sugli elastomeri di sintesi. Il dimetilbutadiene fu scartato per le modeste proprietà dell'elastomero ottenuto, mentre l'isoprene fu messo da parte per l'alto costo della sintesi; il butadiene venne quindi scelto come diene base.
- 1930: sintesi della gomma sintetica di A. M. Collins.
- 1940: primo pneumatico di gomma sintetica.
- 1955: Gomma sintetica da polimero dell'isoprene.

Oggi sappiamo che la gomma naturale è costituita da macromolecole di 1,4-cis-poliisoprene, con grado di polimerizzazione tra 176 e 4852 e che la catena non è formata da maglie elementari di natura ciclica, da dimeri $(C_5H_8)_2$, o da pentameri.

Poiché la gomma è un polimero dal punto di vista chimico, verranno ora introdotte alcune nozioni di base sui materiali polimerici. La parola *polimero* significa letteralmente “molte parti”. Un solido polimerico può essere considerato un materiale che contiene numerose parti o unità legate chimicamente tra loro, collegate a loro volta in modo da formare un solido. Esistono due categorie di materiali polimerici industrialmente importanti: le *materie plastiche* e gli *elastomeri*. Le *materie plastiche* sono un ampio e variato gruppo di materiali sintetici che vengono trasformati attraverso formatura o stampaggio in forme. Così come esistono numerosi tipi di metalli, come l'alluminio e il rame, esistono numerosi tipi di materie plastiche come il polietilene o il nylon. Le materie plastiche possono essere divise in due classi, *materiali termoplastici* e *materiali termoindurenti*, a seconda di come esse sono legate chimicamente nella struttura globale.

- **Materiali Termoplastici** - I materiali termoplastici richiedono l'intervento del calore per essere plasmati e dopo raffreddamento mantengono la forma in cui sono stati modellati. Questi materiali possono essere nuovamente riscaldati e rimodellati in nuove forme un certo numero di volte senza cambiamenti significativi delle loro proprietà. La maggior parte dei termoplastici consiste di catene principali molto lunghe, formate da atomi di carbonio legati tra di loro covalentemente. A volte anche atomi di azoto, ossigeno o zolfo sono legati covalentemente nella catena macromolecolare principale. Legati covalentemente agli atomi della catena

principale vi possono essere atomi o gruppi di atomi pendenti. Nei termoplastici le lunghe catene molecolari sono legate le une alle altre da legami secondari.

- **Materiali Termoindurenti** - Le materie plastiche termoindurenti, modellate in una forma permanente e reticolate o “indurite” attraverso una reazione chimica, non possono essere nuovamente rimodellate con il calore in un'altra forma, ma si degradano o si decompongono dopo essere state riscaldate a una temperatura troppo elevata. Le materie plastiche termoindurenti quindi non possono essere riciclate. Il termine *termoindurente* implica che viene richiesto calore per dare permanentemente forma alla materia plastica; ci sono, tuttavia, molte materie plastiche cosiddette termoindurenti che induriscono, o reticolano, anche attraverso una reazione chimica a temperatura ambiente. La maggior parte dei materiali termoindurenti consiste di una rete di atomi di carbonio legati covalentemente tra di loro per formare un solido rigido; a volte anche azoto, ossigeno, zolfo, o altri atomi sono legati covalentemente nel reticolo tridimensionale.

Per distinguerle da altri polimeri dotati di minore elasticità, le gomme vengono chiamate elastomeri. Con il generico termine di elastomero si indicano le sostanze naturali o sintetiche che hanno le proprietà tipiche del caucciù (*o gomma naturale*), la più evidente delle quali è la capacità di subire grosse deformazioni elastiche, cioè, il poter essere allungati diverse volte riassumendo la propria dimensione iniziale una che il carico che ne ha provocato la deformazione viene eliminato. Gli elastomeri si dividono in due classi principali: termoplastici e termoindurenti; vengono modellati nelle forme desiderate tramite estrusione o stampaggio a caldo.

- Gli elastomeri termoindurenti sono i più comuni e vengono prodotti legando le une alle altre le catene di polimero attraverso l'uso di reattivi chimici, temperatura e pressione in un processo generalmente chiamato vulcanizzazione. A causa di questa modificazione nella loro struttura, una volta modellati non possono venire ulteriormente fusi.
- Gli elastomeri termoplastici, introdotti sul mercato nei tardi anni Sessanta, sono generalmente co-polimeri di stirene e butadiene, poliolefine e co-poliesteri. Una volta stampati, possono venire nuovamente fusi. In questo caso sono presenti comunque buone proprietà di elasticità anche in assenza della vulcanizzazione in quanto le unità di stirene presenti nella formulazione del materiale forniscono allo stesso una reticolazione fisica che garantisce il recupero elastico di grandi deformazioni.

1.1.1. Gomma naturale

Produzione. La gomma naturale viene prodotta commercialmente dal lattice dell'albero *Hevea Brasiliensis*, coltivato in piantagioni soprattutto nelle regioni tropicali dell'Asia sudorientale, specialmente in Malesia e in Indonesia. La fonte della gomma naturale è un liquido lattiginoso noto come lattice (*latex*), una sospensione contenente piccolissime particelle di gomma. Il lattice liquido viene raccolto dagli alberi e portato a un centro di lavorazione dove il lattice nativo viene diluito fino a un contenuto pari al 15% di gomma e coagulato con acido formico (un acido organico). Il materiale coagulato viene quindi compresso attraverso rulli per rimuovere l'acqua e per produrre fogli di materiale. I fogli vengono essiccati con correnti di aria calda oppure per mezzo del riscaldamento del fumo di fuoco (fogli di gomma affumicata). I fogli compressi dai rulli e altri tipi di gomma grezza vengono generalmente laminati tra pesanti rulli in cui l'azione meccanica di taglio rompe in parte le lunghe catene polimeriche e riduce il loro peso molecolare medio. La produzione di gomma naturale nel 1980 rappresentava circa il 30% del mercato mondiale delle gomme.

Struttura. La gomma naturale è principalmente *cis*-1,4 poliisoprene miscelato con piccole quantità di proteine, grassi, sali inorganici e numerosi altri componenti (Fig. 1.2). Il *cis*-1,4 poliisoprene è un polimero a lunga catena (peso medio molecolare di circa 5×10^5 g/mole) con formula di struttura:

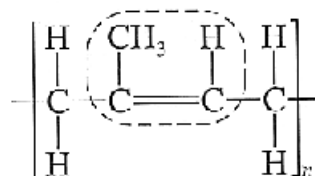


Fig. 1.2 - *cis*-1,4 poliisoprene, unità strutturale ripetitiva della gomma naturale

Il prefisso *cis*- indica che il gruppo metilico e un atomo di idrogeno sono dalla stessa parte del doppio legame carbonio-carbonio, come si può vedere nella zona tratteggiata della formula soprastante. L'indicazione 1,4 indica che l'unità ripetitiva della catena polimerica si lega covalentemente al primo e al quarto atomo di carbonio dell'isoprene. Le catene polimeriche della gomma naturale sono lunghe, allacciate e avvolte a spirale; a temperatura ambiente sono nello stato di continua agitazione. Il piegamento e l'avvolgimento delle catene polimeriche della gomma naturale sono attribuiti all'impedimento sterico del gruppo metilico che si trova dalla stessa parte dell'atomo di idrogeno sul doppio legame covalente carbonio-carbonio.

L'arrangiamento nello spazio dei doppi legami covalenti nella catena polimerica della gomma naturale è mostrato schematicamente in Fig. 1.3:

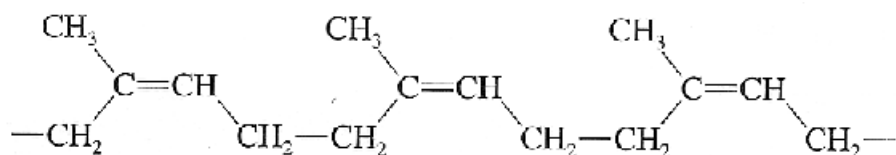


Fig. 1.3 - Segmento di catena polimerica della gomma naturale

Esiste un altro isomero strutturale del poliisoprene (gli isomeri strutturali sono molecole che hanno uguale forma molecolare, ma diversa disposizione nello spazio dei loro atomi costituenti), il *trans*-1,4 poliisoprene, detto *guttaperca*, che non è un elastomero. Nella struttura di questo polimero il gruppo metilico e l'atomo di idrogeno legati covalentemente al doppio legame dell'unità ripetitiva del poliisoprene si trovano da parti opposte rispetto al doppio legame, come mostrato nella zona tratteggiata della formula in Fig. 1.4:

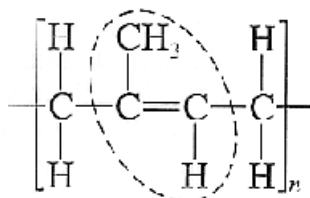


Fig. 1.4 - *trans*-1,4 poliisoprene, unità strutturale ripetitiva del guttaperca

In questa struttura il gruppo metile e l'atomo di idrogeno legati al doppio legame covalente non interferiscono reciprocamente e come conseguenza la molecola del *trans*-1,4 poliisoprene è più simmetrica e può cristallizzare in un materiale rigido (Fig. 1.5).

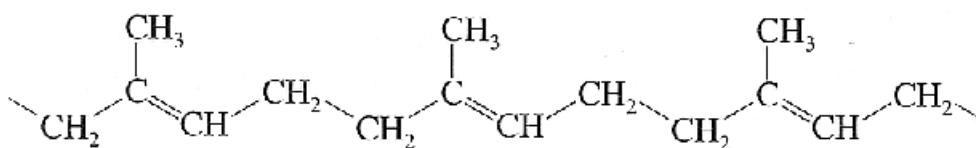


Fig. 1.5 - Segmento di catena polimerica della guttaperca

Vulcanizzazione. La vulcanizzazione è il processo chimico con cui molecole polimeriche vengono unite da ponti di reticolazione in molecole più grosse per limitare i movimenti molecolari. Nel 1839 Charles Goodyear scoprì un processo di vulcanizzazione per la gomma utilizzando zolfo e carbonato basico di piombo. Goodyear trovò che quando una miscela di gomma naturale, zolfo e carbonato di piombo veniva riscaldata, la gomma si trasformava da materiale termoplastico in elastomero. Benchè ancora oggi la complessa reazione dello zolfo con la gomma non sia stata completamente compresa, il risultato finale consiste nell'apertura di alcuni

doppi legami poliisoprenici con la formazione di ponti di reticolazione formati da atomi di zolfo, come mostrato in Fig. 1.6.

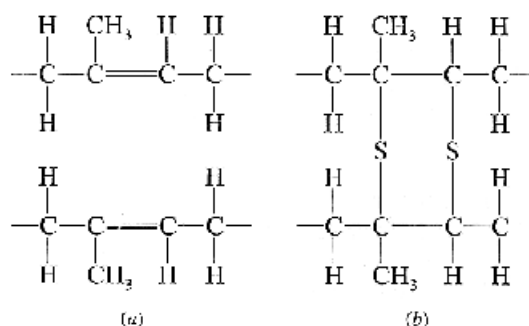


Fig. 1.6 - Rappresentazione schematica della vulcanizzazione della gomma.

La Fig. 1.7 mostra schematicamente come la reticolazione con atomi di zolfo impartisca rigidità alle molecole della gomma, mentre il Grafico 1.1 fa vedere come la resistenza a trazione della gomma naturale venga aumentata con la vulcanizzazione. La gomma e lo zolfo reagiscono molto lentamente anche a temperature elevate, per cui si usa generalmente miscelare alla gomma degli acceleranti chimici, insieme ad altri additivi come riempitivi, plastificanti, antiossidanti, per accorciare il tempo di reticolazione a temperature elevate.

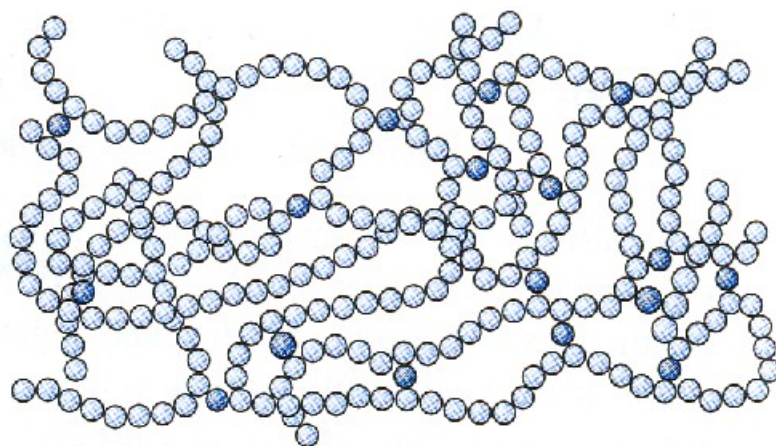


Fig. 1.7 - Modello di reticolazione delle catene di *cis*-1,4 poliisoprene con atomi di zolfo

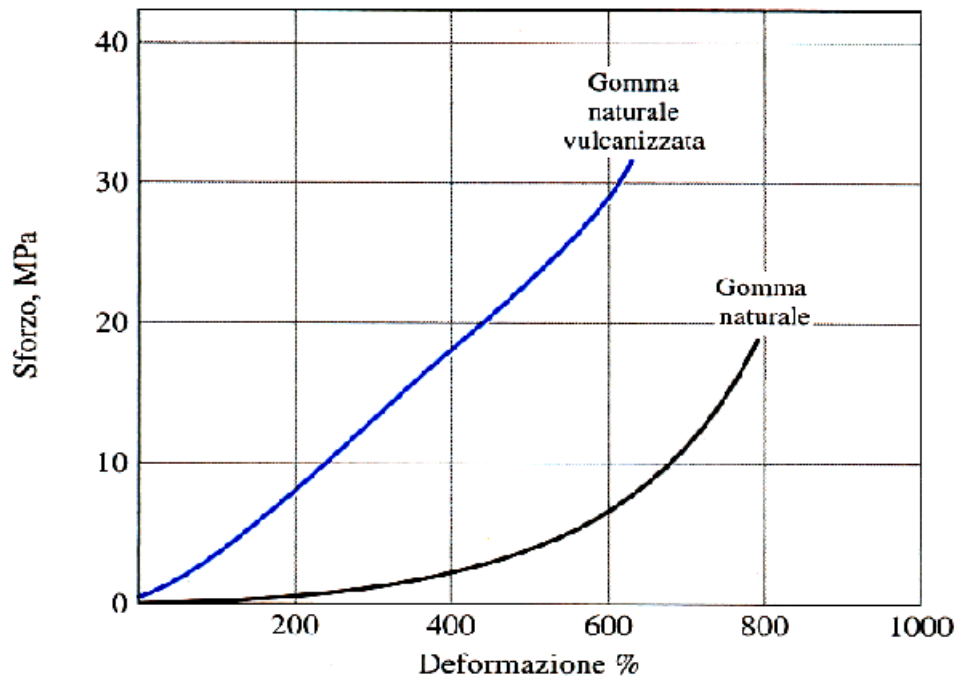


Grafico 1.1 - Diagrammi sforzo/deformazione della gomma naturale prima e dopo la vulcanizzazione.

Generalmente, le gomme morbide vulcanizzate contengono circa il 3% in peso di zolfo e vengono riscaldate nell'intervallo tra 100 e 200°C per la vulcanizzazione o indurimento. Se si aumenta il contenuto di zolfo, aumenta anche la quantità di reticolazioni, dando un materiale più duro e meno flessibile. Una struttura completamente rigida di gomma dura può essere ottenuta con circa il 45% di zolfo. Anche l'ossigeno e l'ozono reagiscono con i doppi legami di carbonio delle molecole di gomma in modo simile alla reazione di vulcanizzazione con zolfo, provocando però infragilimento della gomma. La reazione di ossidazione può essere ritardata in certo qual modo aggiungendo antiossidanti quando si effettua la miscelazione della gomma. L'uso di cariche può abbassare il costo dei prodotti in gomma e inoltre, a differenza di altri materiali polimerici, rinforza il materiale. Il nerofumo viene comunemente usato come carica per la gomma e, in generale, più fini sono le particelle di nerofumo, maggiore è la resistenza a trazione. Il nerofumo fa anche aumentare la resistenza alla lacerazione e all'abrasione della gomma. Anche silici (ad esempio silicato di calcio) e argilla chimicamente modificata sono utilizzati come carica per le gomme.

Proprietà. La Tab. 1.1 confronta resistenza a trazione, proprietà di allungamento e densità della gomma naturale vulcanizzata con le stesse proprietà di alcuni elastomeri di sintesi. Da notare, come da aspettarsi, la resistenza a trazione relativamente bassa e la capacità di allungamento estremamente elevata di questi materiali.

Elastomero	Resistenza a trazione (MPa)	Allungamento %	Densità (g/cm ³)	Temperatura di esercizio raccomandata (°C)
Gomma Naturale* (<i>cis-poliisoprene</i>)	17 – 24	750 – 850	0,93	da -50 a +82
SBR o Buna S* (<i>butadiene-stirene</i>)	1,4 – 24	400 – 600	0,94	da -50 a +82
Neoprene* (<i>policloroprene</i>)	21 – 28	800 – 900	1,25	da -40 a +115
Silicone (<i>polisilossano</i>)	4,1 – 9,0	100 – 500	1,1 – 1,6	da -115 a +315

Tab. 1.1 - Alcune proprietà di elastomeri selezionati (*proprietà della gomma pura vulcanizzata)

1.1.2. Gomma sintetica

Le gomme sintetiche nel 1980 rappresentavano il 70% dei consumi mondiali di materiali gommosi. Alcune delle gomme sintetiche più importanti sono le stirene-butadiene, le gomme nitrile, e i policloropreni.

Gomme stirene-butadiene. La più importante gomma sintetica e la più largamente utilizzata è la gomma stirene-butadiene (SBR), un copolimero casuale di butadiene-stirene. Dopo la polimerizzazione, questo materiale contiene da 20 a 23% di stirene. La struttura di base è mostrata in Fig. 1.8:

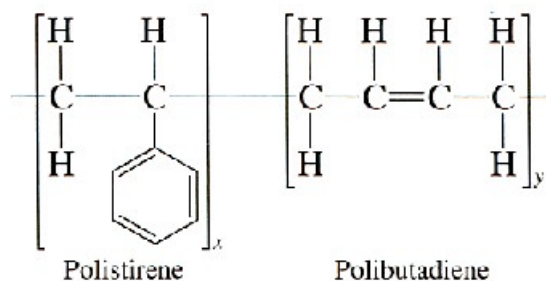


Fig. 1.8 - Struttura chimica del copolimero stirene-butadiene, gomma sintetica

Dal momento che l'unità monomerica butadiene contiene doppi legami, questo copolimero può essere vulcanizzato con zolfo per reticolazione. Il butadiene di per sé, se sintetizzato con un

catalizzatore stereospecifico per dare l'isomero *cis*-, ha un'elasticità anche pari alla gomma naturale perchè il gruppo metilico attaccato al doppio legame nella gomma. La presenza di stirene nel copolimero dà luogo ad una gomma più tenace e resistente. I gruppi fenilici laterali dello stirene, distribuiti lungo la catena principale del copolimero, riducono la tendenza del polimero a cristallizzare sotto alto sforzo. La gomma SBR ha costi inferiori rispetto alla gomma naturale e per questo viene utilizzata in molte applicazioni dove si richiedano gomme più a buon mercato ma con buone proprietà meccaniche. Per esempio, nel caso dei battistrada di pneumatici, la SBR ha una migliore resistenza all'usura ma più elevata produzione di calore. Uno svantaggio della SBR rispetto alla gomma naturale è dato dell'assorbimento di solventi organici come benzina e petrolio e dal rigonfiamento.

Gomme nitrile. Le gomme nitrile sono copolimeri del butadiene e dell'acrilonitrile nei rapporti che vanno da 55 a 82% di butadiene e da 45 a 18% di acrilonitrile. La presenza del gruppo nitrile aumenta il grado di polarizzazione nella catena principale e la quantità di legami idrogeno tra catene adiacenti. I gruppi nitrile forniscono buona resistenza agli oli e ai solventi, e aumentano la resistenza all'abrasione e al calore. D'altra parte, viene ridotta la flessibilità molecolare. Le gomme nitrile sono più costose delle gomme comuni, per questo motivo questi copolimeri sono limitati ad applicazioni speciali, come tubi e guarnizioni per il carburante, dove è richiesta elevata resistenza a oli e solventi.

Policloroprene (Neoprene). Le gomme policloroprene o neoprene sono simili all'isoprene (Fig. 1.9), con la differenza che il gruppo metilico attaccato al doppio legame del carbonio viene sostituito un atomo di cloro:

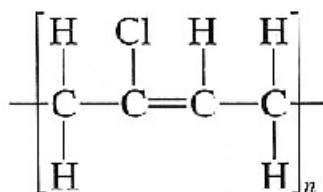


Fig. 1.9 - Unità strutturale del policloroprene (neoprene)

La presenza dell'atomo di cloro aumenta la resistenza dei doppi legami insaturi all'attacco di ossigeno, ozono, calore, luce e condizioni climatiche. I neopreni hanno anche buona resistenza agli oli e carburanti e resistenza meccanica superiore a quella delle gomme comuni. Tuttavia hanno ridotta flessibilità a basse temperature e costi più elevati. Come conseguenza, i neopreni sono usati in applicazioni specialistiche come i rivestimenti di fili e cavi, raccordi e cinghie industriali, membrane e guarnizioni a tenuta in campo automobilistico.

Proprietà degli elastomeri policloroprene. Il neoprene è venduto ai produttori come gomma sintetica grezza. Prima di essere convertito in prodotti finali, deve essere mescolato con selezionati reagenti chimici, cariche e agenti per la lavorazione. La miscela risultante viene quindi formata e vulcanizzata. Le proprietà di questo prodotto finale dipendono dalla quantità di neoprene grezzo e di additivi aggiunti. La Tab. 1.2 illustra alcune proprietà fisiche di base del policloroprene come gomma grezza, gomma vulcanizzata e vulcanizzata con nerofumo come carica.

Proprietà	Polimero di base	Vulcanizzati	
		Gomma	Nerofumo
Densità (g/cm ³)	1,23	1,32	1,42
Coeff. Esp. Vol.		6	
$\beta = 1/v \cdot \delta v/\delta T, \kappa^{-1}$	600×10^{-6}	720×10^{-6}	
<i>Proprietà Termiche</i>			
Tg, °C	-45	-45	-45
Capacità termica	2,2	2,2	1,7 – 1,8
Conducibilità termica	0,192	0,192	0,210
<i>Proprietà Elettriche</i>			
Costante dielettrica (1 kHz)		6,5 – 8,1	
Fattore di dissipazione (1 kHz)		0,031 – 0,086	
Conducibilità (pS/m)		3 - 1400	
<i>Proprietà Meccaniche</i>			
Allungamento (%)		800 - 1000	500 – 600
Resistenza a trazione (MPa)		25 - 38	21 - 30
Moduli di Young (MPa)		1,6	3 - 5
Resilienza (%)		60 - 65	40 - 50

Tab. 1.2 – Proprietà fisiche di base del policloroprene

Vulcanizzazione degli elastomeri policloroprene. La vulcanizzazione degli elastomeri policloroprene dipende dagli ossidi metallici e dai solfuri che vengono utilizzati per molti materiali elastomerici (Fig. 1.10). L'ossido di zinco e di magnesio sono quelli maggiormente utilizzati. Si ritiene che il processo di vulcanizzazione avvenga secondo la reazione:

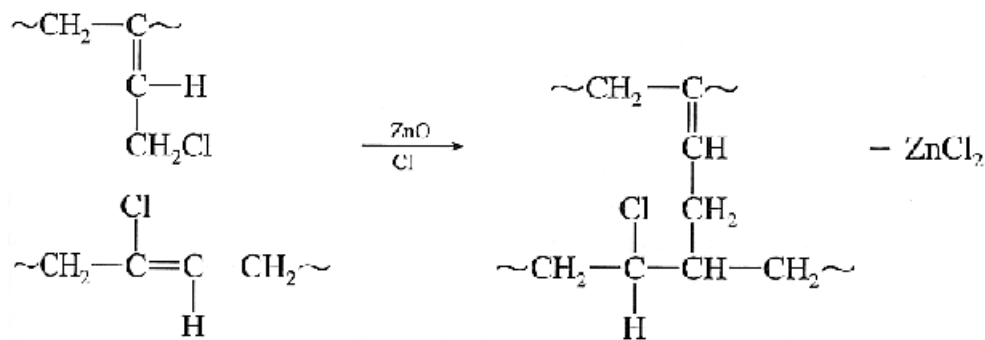


Fig. 1.10 -Possibile reazione chimica durante la vulcanizzazione del policloroprene

Il cloruro di zinco formato è un catalizzatore attivo per la vulcanizzazione e, anche se viene rimosso, può causare problemi durante le lavorazioni successive. L'ossido MgO può agire come stabilizzatore per rimuovere ZnCl₂ come mostra la seguente reazione di Fig. 1.11 :

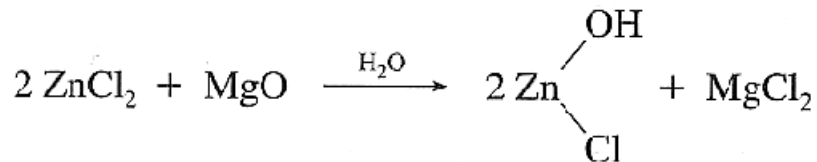


Fig. 1.11 – reazione tra ZnCl₂ e MgO

Gomme siliconiche. L'atomo del silicio, come quello di carbonio, ha valenza 4 ed è in grado di formare molecole polimeriche attraverso legami covalenti. Tuttavia, i polimeri siliconici hanno unità ripetitive formate da silicio e ossigeno come mostrato di seguito la Fig. 1.12:

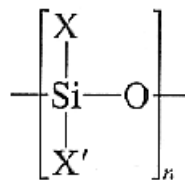


Fig. 1.12 - Unità strutturale ripetitiva di base di un polimero siliconico

Dove X e X' possono essere atomi di idrogeno o gruppi come il metilico (CH₃—) o il fenilico (C₆H₅—).

I polimeri siliconici contenenti silicio e ossigeno nella catena principale sono chiamati siliconi (Fig. 1.13). Tra i molti elastomeri siliconici, il tipo più comune è quello in cui X e X' nella unità ripetitiva sono gruppi metilici:

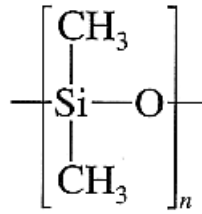


Fig. 1.13 - Unità strutturale ripetitiva del polidimetilsilossilano

Questo polimero viene chiamato *polidimetilsilossilano* e può essere reticolato a temperatura ambiente per aggiunta di un iniziatore (ad esempio benzoin perossido) che fa reagire tra di loro i due gruppi metilici con l'eliminazione di una molecola di gas idrogeno H₂ per formare ponti Si—CH₂—CH₂—. Altri tipi di silicani possono essere reticolati ad alte temperature (ad esempio da 50 a 150°C), a seconda del prodotto e dell'utilizzo voluto. Le gomme siliconiche presentano il grande vantaggio di poter essere usate in un ampio intervallo di temperature (da -100 a 250°C) ma hanno generalmente proprietà meccaniche molto scadenti. Le applicazioni per le gomme siliconiche includono dispositivi e guarnizioni a tenuta, isolamento elettrico, cavi per auto-ignizione ed elementi di protezione delle candele.

1.1.3. Produzione della gomma

Le piantagioni

La coltivazione degli alberi della gomma ebbe la massima espansione negli anni immediatamente precedenti la seconda guerra mondiale. Prima della distruzione avvenuta durante il conflitto, le piantagioni coprivano complessivamente quasi quattro milioni di ettari, distribuiti nelle regioni dello Sri Lanka, della Malesia e dell'attuale Indonesia (Foto 1.1). L'improvvisa carenza di materia prima, verificatasi al termine della guerra, da un lato rese evidente l'importanza economica e politica della gomma naturale, dall'altro stimolò la ricerca di prodotti alternativi, in particolar modo di gomma sintetica.

I maggiori produttori di gomma naturale, ricavata dal lattice di diversi tipi di piante, sono i paesi dell'Asia sudorientale.



Foto 1.1 - Piantagione di alberi della gomma

I paesi occidentali preferiscono la gomma sintetica, la cui produzione è indipendente da fattori naturali incontrollabili quali le frequenti malattie delle foglie a cui gli alberi della gomma sono soggetti.

Estrazione del lattice

Il lattice viene estratto praticando incisioni diagonali nella corteccia dell'albero della gomma. Da ogni incisione, che si estende per un terzo o circa metà della circonferenza del tronco, si ricavano circa 30 ml di lattice. Nelle piantagioni vengono coltivati 200-250 alberi per ettaro, in modo da ottenere una resa annua di circa 450 kg di lattice per ettaro. Una volta estratto, il materiale viene filtrato, diluito con acqua e trattato con acidi per consentire alle particelle di gomma in sospensione colloidale di formare un aggregato che viene quindi schiacciato in pani, lastre o fogli sottili e asciugato (Foto 1.2).



Foto 1.2 - Spillatura del lattice da un albero della gomma

Il procedimento di produzione della gomma ha inizio con la spillatura del lattice dagli alberi della gomma, per mezzo di incisioni praticate sulla corteccia. Il materiale viene raccolto in cisterne,

fatto coagulare e pressato in fogli di gomma grezza crespata che, una volta asciugati, vengono usati come materia prima per la fabbricazione degli oggetti.

Lavorazione della gomma greggia

Nell'attuale produzione di articoli in caucciù, la gomma greggia viene dapprima miscelata ad altri ingredienti, quindi, secondo le diverse esigenze, viene applicata a una base (ad esempio un tessuto) oppure plasmata direttamente. Al termine del processo, l'oggetto rivestito o modellato viene posto in uno stampo e sottoposto a vulcanizzazione.

Dalle piantagioni di *Hevea* la gomma greggia giunge perlopiù sotto forma di fogli, lastre o pani e solo in alcuni tipi di lavorazione viene usato il lattice non ancora coagulato. La gomma riciclata, trattata con basi per 12-30 ore, può essere invece usata come adulterante della gomma greggia, riducendo il prezzo, ma anche la qualità dell'articolo finito.

Per la maggior parte delle applicazioni la gomma greggia è mescolata con vari ingredienti che ne modificano le caratteristiche. Composti come il gesso in polvere, il carbonato di calcio e il solfato di bario induriscono la gomma senza aumentarne la resistenza, al contrario di sostanze come il nerofumo, l'ossido di zinco, il carbonato di magnesio e varie argille.

Per conferire il colore desiderato si usano pigmenti quali l'ossido di zinco, il litopone e numerosi coloranti organici. Oli, cere, catrame di conifera e acidi grassi sono spesso usati per ammorbidire la mescola e permettere una migliore amalgamazione degli ingredienti.

Il principale agente vulcanizzante è lo zolfo, talvolta addizionato con piccole quantità di selenio e tellurio. Nella vulcanizzazione a caldo, l'elemento viene macinato e aggiunto alla gomma insieme agli altri ingredienti. La percentuale di zolfo varia dal 2,5% nelle gomme morbide, al 50% in quelle dure.

Nella vulcanizzazione a freddo, usata per produrre guanti e altri oggetti sottili, il manufatto viene esposto a vapori di cloruro di zolfo, S_2Cl_2 . Come agenti acceleratori della vulcanizzazione vengono usati sia ossidi metallici, come la biacca e la calce, sia diversi tipi di ammine.

Masticazione

Prima di essere mescolata con altri ingredienti, la gomma greggia viene sottoposta a un processo detto di masticazione, che ha lo scopo di renderla soffice, morbida e viscosa. Un tempo venivano usati speciali mulini costituiti da due rulli d'acciaio che, ruotando a diversa velocità, rompevano i pani di gomma e li impastavano.

La temperatura veniva controllata per mezzo di acqua fredda o di vapore. Dal 1920 sono stati introdotti i plastificatori di Gordon, costituiti da una ruota elicoidale che viene fatta ruotare con

velocità variabile all'interno di un cilindro (coclea), generando per attrito una temperatura di 180° C circa: l'azione meccanica e il calore riducono la gomma nelle condizioni di viscosità desiderate (Foto 1.3).



Foto 1.3 - Mulino per la masticazione della gomma

Mescola

Dalle macchine masticatrici la gomma viene trasferita nelle mescolatrici, costituite da una coppia di cilindri che ruotano in direzioni opposte. Macchine mescolatrici chiuse vengono usate nella produzione di soluzioni di gomma e di mastici, che richiede l'aggiunta di solventi; nella maggior parte dei casi, comunque, gli ingredienti vengono mescolati a secco (Foto 1.4 e Foto 1.5).



Foto 1.4 - Mescolatore a cilindri



Foto 1.5 –Particolare interno di un mescolatore

Calandratura

La gomma greggia, una volta mescolata agli altri ingredienti nelle macchine mescolatrici, subisce il processo di calandratura o di estrusione, secondo l'uso a cui è destinata. Le calandre vengono usate nella produzione di fogli di gomma lisci o lavorati (ad esempio recanti impresso il disegno del battistrada di un pneumatico). Sono costituite da tre o cinque rulli dello stesso diametro; lo spazio tra un rullo e l'altro e la loro velocità sono regolati in funzione delle caratteristiche del foglio che si vuole ottenere. Prima della vulcanizzazione, la gomma caldrata può ancora essere modellata.

Nella Foto 1.6 si osserva una tipica calandra a 3 rulli e come avviene la lavorazione della gomma naturale in Sri-Lanka. La calandra è costituita da una serie di rulli attraverso cui passa il materiale grezzo per essere pressato e stampato a seconda delle esigenze.



Foto 1.6 - Calandra a 3 rulli e Sri-Lanka, produzione della gomma

Estrusione

Il processo di estrusione, che permette di ricavare strisce di gomma piatte, tubolari o di altre forme, viene usato nella produzione di tubature e di guarnizioni per porte e finestre (Foto 1.7).



Foto 1.7 - Estrusore

Vulcanizzazione

A fabbricazione completa, la maggior parte degli oggetti di gomma viene sottoposta a vulcanizzazione in condizioni di temperatura e pressione elevate. In alcuni casi gli oggetti vengono vulcanizzati in stampi premuti da presse idrauliche; in altri casi vengono sottoposti a una pressione di vapore interna o esterna durante il riscaldamento. Ad esempio, i tubi da giardino vengono rivestiti di piombo e vulcanizzati facendo passare al loro interno vapore ad alta pressione: in questo modo il tubo viene premuto contro il rivestimento di piombo che, a processo ultimato, viene rimosso e riciclato per fusione (Foto 1.8).



Foto 1.8 -Vulcanizzatrice tipo VPR

Vulcanizzatrice di nuova concezione, con cinematica integrata, che sfrutta un principio di traslazione centripeta, generata da un movimento angolare/circonfrenziale.

Questa realizzazione permette di ottenere contemporaneamente sia la movimentazione dello stampo che il bloccaggio meccanico dell'intero sistema per la vulcanizzazione. Il contenitore a settori multipli (otto o più) è parte integrante della macchina, per cui le variazioni dimensionali dello stampo interessano solamente la costruzione della matrice (battistrada) e delle fiancate. Il riscaldamento dello stampo può essere effettuato sia a vapore che ad elettricità. E' prevista la gestione di qualsiasi fluido liquido o gassoso all'interno del pneumatico (Foto 1.9).



Foto 1.9 -Vulcanizzatrice tipo CR

Le vulcanizzatrici della linea CR permettono la vulcanizzazione di pneumatici nuovi o ricostruiti e anche lo stampaggio di cingoli. La movimentazione è di tipo idraulico e gestita da centralina propria. I settori in acciaio, che costituiscono la parte essenziale della macchina, si muovono verticalmente e, per effetto di guide inclinate, eseguono un movimento di chiusura/apertura radiale. Il riscaldamento dello stampo può essere fatto con vapore, elettricità o altri fluidi diatermici (Foto 1.10).



Foto 1.10 -Vulcanizzatrice tipo CONE

Le vulcanizzatrici della linea CONE realizzate per la ricostruzione dei pneumatici a carcassa radiale, permettono anche la ricostruzione di altri tipi di pneumatici. La movimentazione è di tipo idraulico e gestita da centralina propria. I settori in acciaio, che costituiscono la parte essenziale

della macchina, scorrono con movimento perfettamente radiale su guide in bronzo ricavate su un piano inferiore di base. Tali settori vengono bloccati meccanicamente da una cintura conica di tenuta per la fase di vulcanizzazione. Le varie fasi di movimentazione avvengono automaticamente.

Il riscaldamento dello stampo può essere fatto con vapore, elettricità o altri fluidi diatermici. Il gonfiaggio può essere fatto con gas, miscela aria vapore o acqua calda.

Usi

La gomma non vulcanizzata viene usata per produrre mastici, adesivi, isolanti e soles delle scarpe. Molto più diffusa invece è la gomma vulcanizzata che, grazie alla elevata resistenza all'abrasione, è adatta alla produzione dei battistrada per pneumatici e dei nastri trasportatori; con le gomme più dure vengono invece costruite tubature in grado di sopportare il passaggio di sostanze abrasive. La flessibilità della gomma viene sfruttata nella fabbricazione di tubi e rulli per presse da stampa; l'elasticità, invece, permette di costruire supporti capaci di assorbire gli urti e ridurre le vibrazioni. La gomma è impermeabile ai gas, perciò viene usata per costruire oggetti gonfiabili e tubi per l'aria compressa; poichè resiste anche all'acqua e ad alcuni liquidi organici, viene impiegata per impermeabilizzare gli abiti e per rivestire serbatoi e autobotti. L'elevata resistenza elettrica, inoltre, la rende utilizzabile come materiale isolante.

1.2 Il pneumatico

1.2.1 Origini del pneumatico

Quando lo scozzese Robert William Thomson depositò la propria invenzione all'Ufficio Brevetti di Londra il 10 giugno 1846 ("Applicazione di supporti elastici intorno alle ruote di veicoli, allo scopo di diminuire lo sforzo necessario a trainarli, rendere il loro movimento più facile e attutire il rumore che fanno quando si muovono"), nessuno fece particolare attenzione all'evento: i "veicoli, (bici ed automobile), di fatto non erano ancora stati inventati. Al tempo si conoscevano già le proprietà del lattice del caa-o-chu, ormai diffuso negli Stati Uniti, in Germania, Francia e Gran Bretagna.

Dal materiale lavorato a caldo, masticato fra due cilindri dentati e finalmente versato in stampi, si potevano ottenere svariati oggetti, che però mantenevano le loro caratteristiche elastiche soltanto a temperatura ambiente: con il caldo tendevano a sciogliersi nuovamente in lattice e col freddo ad irrigidirsi perdendo ogni elasticità. Fu Charles Goodyear che nel 1839 mescolando zolfo alla gomma, ottenne un prodotto resistente alle variazioni di temperatura e in grado perciò di conservare nel tempo l'elasticità. Nel 1844 Goodyear brevettò il suo ritrovato e iniziò una certa

produzione della gomma per vari usi, compreso il rivestire le cerchiature delle carrozze. Ma Goodyear non era destinato alla notorietà: vissuto tra il 1800 e il 1860, non solo non ebbe mano nella fondazione dell'impresa statunitense che ancora oggi porta in omaggio il suo nome, ma addirittura morì poverissimo, in quanto il suo brevetto di "vulcanizzazione" fu copiato da tutti senza che egli riuscisse a far valere i propri diritti. Lo stesso Thomson non ebbe una sorte migliore: nel 1873 morì all'età di 53 anni, unico proprietario al mondo di una carrozza che montasse ruote pneumatiche.

La sua "ruota aerea" fu completamente dimenticata per diversi anni, ma il suo brevetto conteneva già l'intera invenzione del pneumatico: la realizzazione della camera d'aria con una foglia di gomma, oppure in tela impregnata di gomma o di guttaperca, (un rivestimento di cuoio atto a sopportare il peso e le torsioni della ruota); la vulcanizzazione della gomma tramite immersione nello zolfo e la valvola per gonfiare d'aria il pneumatico, (l'idea che rappresenta il principio fondamentale del brevetto del pneumatico). Thomson riteneva infatti che l'aria fosse il mezzo di trasporto migliore: "durante la sua rivoluzione, la ruota avrebbe sempre presentato verso la strada, il binario, la carreggiata, un cuscino d'aria".

Il fatto stesso che accennasse al binario dimostra che aveva intuito le enormi potenzialità d'uso del suo ritrovato. Si era spinto fino a ipotizzare eventuali altre sostanze solide che, in combinazione con l'aria, rendessero la gomma più resistente alle forature (la schiuma sintetica, che viene oggi utilizzata in caso di foratura, si basa su un principio non molto differente da quello formulato da Thomson). Aveva previsto persino la camera d'aria multipla.

Non restava che la dimostrazione pratica, organizzata al Regents Park di Londra l'anno dopo, con una carrozza a cavalli. I risultati di questa prova furono pubblicati sulla rivista "The Mechanic's Magazine", nel 1849, e le cifre a commento furono significative. Sul selciato a macadam (cioè pavimentato con pietrisco e bitume) si registrò una riduzione del 40% della forza necessaria a trainare la carrozza. Inoltre il silenzio, il maggiore comfort e la facile manovrabilità stupirono particolarmente gli spettatori presenti quel giorno. L'esperimento non ebbe seguito: nessuno si presentò a sviluppare industrialmente l'idea e tutto venne presto dimenticato.

L'uomo che inventò il pneumatico per la seconda volta fu John Boyd Dunlop, nato in Scozia nel 1840. A quarantaquattro anni, nel 1888, si trovò a cercare una soluzione per il figlio piccolo, che si lamentava di un triciclo troppo lento e troppo pesante da guidare. Dunlop pensò ad una gomma vuota riempita d'aria, in modo da dare alla ruota una sezione adeguata senza un peso eccessivo, (come invece succedeva con le ruote piene). Una foto storica ritrae Dunlop lanciare una ruota verso il muro di casa, distante alcune decine di metri, durante un test per vedere il comportamento dei due tipi di ruote: la ruota piena perse la propria energia dopo pochi metri e cadde su se stessa;

lanciata con lo stesso gesto e la stessa forza, quella pneumatica invece attraversò tutto il cortile, urtò contro la parete e rimbalzò, con ancora energia motrice da dissipare.

Il brevetto fu depositato il 23 luglio dello stesso anno. Si faceva esplicito riferimento all'utilità del ritrovato per veicoli leggeri, biciclette e carrozzelle: come equipaggiamento per biciclette il successo fu subito formidabile. Appena un anno dopo, nel giugno 1889, il pneumatico fu applicato alla bicicletta di William Hume, un ciclista definito niente di più che mediocre, per le competizioni del Queen's College Sports, a Belfast. Vinse tutte e tre le gare a cui si iscrisse, e con tale disinvoltura che la ditta di Belfast Edlin & Co. vendette nel giro di pochi giorni ben cinquanta biciclette equipaggiate con le nuove ruote.

A Dublino, alla fine dell'anno, si costituì la Pneumatic Tyre and Booth's Cycle Agency Limited, con un capitale di 25.000 sterline: la Edlin fu subito incorporata. Il Presidente della Società, Harvey du Cros, era entusiasta: "Le vibrazioni, con il conseguente esaurimento nervoso che pesa di più sul pilota nel corso di un lungo viaggio della stessa fatica fisica, sono praticamente ridotte a zero...questo, in aggiunta alla migliore tenuta di strada, rende le vetture dotate di simili ruote ben superiori a qualsiasi concorrenza". Inaspettatamente nel giugno del 1890, ad un funzionario dell'Uffici Brevetti di Londra capitò sotto gli occhi una pubblicazione di tre anni prima che riportava una lista di "Ruote elastiche", scelte tra ottanta brevetti depositati dal 1772 al 1887.

Tra i quattro considerati più interessanti, vi era la ruota aerea di Thomson, con relativi disegni. Il funzionario avvertì un amico di Dunlop, allora Direttore Generale della società, ed egli, coraggiosamente, ne parlò in Consiglio di Amministrazione, l'11 settembre. Per la fine del mese, tutto il mondo industriale inglese sapeva del brevetto Thomson, di quasi cinquant'anni prima. L'opinione pubblica fu unanime nel riconoscere l'assoluta correttezza di Dunlop, il quale, del tutto ignaro del lavoro del suo predecessore scozzese, era ripartito da zero mostrando almeno altrettanta genialità nell'arrivare alle stesse conclusioni. Ma questo non impedì all'Ufficio Brevetti di invalidare la priorità di Dunlop.

Inoltre rimanevano da risolvere grandi problemi, quale il fissaggio del pneumatico al cerchione, che dava origine a frequenti forature, costringendo ad un pesante lavoro di smontaggio e montaggio. La prima soluzione giunse da un ingegnere del Middlesex, Charles Kingston Welch. Egli escogitò il "tallone", ossia un cerchione, non più piatto come quello dei carri ma con un alveo centrale in cui accogliere la camera d'aria, con rialzi laterali vagamente somiglianti ad una tenaglia, in grado cioè di artigliare ed avvolgere le parti del copertone che andavano a collocarvisi. Il pneumatico a tallone presentava a sua volta un ispessimento sui lati che, da una parte e dall'altra, andavano ad incunearsi nell'alveo del cerchione. La cosa funzionava bene

finché il pneumatico era in pressione; ma bastava un leggero aumento della velocità del veicolo per provocare drammatiche fuoriuscite del copertone dalla sede.

Brevettata il 16 settembre 1890, questa soluzione fu immediatamente acquistata dalla Pneumatic Tyre Company, che poté, a cinque giorni soli dalla “rivelazione”, già contare su un accorgimento pienamente commerciabile.

Trentasei giorni dopo arrivò un altro inventore, l'americano William Erskine Bartlett, trapiantato in Scozia già da una ventina di anni. Egli ideò un copertone lungo cui correivano, per l'intera circonferenza, alle due estremità, due cavi d'acciaio ad anello, i cosiddetti cerchietti. Essi andavano ad incastrarsi nella parte incavata del cerchione: non potendo muoversi da questa configurazione e avendo un diametro inferiore a quello necessario a fuoriuscire dalla sede, fissavano stabilmente l'intero pneumatico. La Pneumatic Tyre Company si rese conto che in questi due accorgimenti risiedeva la possibilità di ritentare la scalata al mercato, perché permettevano di offrire un prodotto concorrenziale di cui si detenevano i pieni diritti. Non la pensava così Dunlop, il quale aveva reagito alla scoperta dell'invalidità del suo brevetto concentrandosi su come progettare un ciclo dotato di maggior confort: nell'ottobre presentò una bicicletta con ruote piene e telaio costituito interamente da molle a balestra.

Ma il suo destino era quello di essere sempre spiazzato, poiché, di fronte alla possibilità offerta da Welch e Bartlett di tornare alla ruota pneumatica, ormai universalmente ritenuta vincente, nessuno si soffermò più di tanto sulla sua invenzione.

Passarono alcuni anni di dignitoso declino del suo ruolo all'interno dell'azienda, finché nel marzo 1895 rassegnò le dimissioni da direttore. Gli anni che seguirono furono fecondi di invenzioni non tutte geniali: ben seicento brevetti riguardarono l'adozione di una banda d'acciaio in cui racchiudere il battistrada, per renderlo impermeabile alle forature. Lo scopo era sicuramente raggiunto, ma l'effetto finale si rivelò sempre, com'è facile immaginare, poco soddisfacente.

Un altro gruppo di inventori si impegnò invece, con ben altri risultati, a superare il problema del surriscaldamento del pneumatico. Succedeva infatti, nei primi tipi, che lo sfregamento tra i fili di ordito e i fili di trama delle tele comuni di cui era costituita la carcassa del copertone, producesse un attrito tale da portarli ben presto all'usura e alla rottura. Venne escogitato, in seguito da David Moseley, un tessuto senza trama, chiamato “Flexifort”, costituito da una striscia di fili paralleli, annegati in gomma e disposti in tele sovrapposte e incrociate in modo che i fili degli strati successivi formassero un certo angolo tra loro e con il piano di simmetria del pneumatico (perfezionamento di Welch, brevetti del 1888, 1894, 1895). La data del deposito del brevetto neanche stavolta, però, corrispose all'avvio dell'utilizzo commerciale. Tale tessuto senza trama, chiamato anche “cord”, cominciò ad essere impiegato in grande scala soltanto a partire dal 1914.

Anche il perfezionamento del battistrada fu un campo su cui si esercitarono a lungo le menti fertili degli inventori di fine secolo: il battistrada era spesso in cuoio e la gomma biancastra degli inizi si usurava molto rapidamente nell'affrontare le asperità del terreno.

Dal 1912 circa alcuni pneumatici americani si fecero neri per l'aggiunta di nerofumo, che se miscelato alla gomma ne aumentava la resistenza all'usura. La novità impiegò alcuni anni ad arrivare in Europa, e si coniugò al declino dell'utilizzo del cuoio, a favore di un battistrada scolpito in gomma.

Su come scolpirlo, alcuni ebbero la brillante idea di incidervi il nome dell'azienda produttrice, in modo da lasciare, sulle strade allora non asfaltate ma piene di polvere, chiara traccia del passaggio. Alla fine del secolo non circolavano più soltanto biciclette bensì anche automobili, e dunque si apriva per le ruote pneumatiche un altro, ben più vasto ed insondato, mercato potenziale.

E' curioso notare come, nel trasferire conoscenze ed esperienze dal campo della bicicletta a quello dell'automobile, si ripartì da zero o quasi. Nel 1896 la bicicletta montava normalmente pneumatici cord, a battistrada scolpito anti-skid; mentre le vetture ancora disponevano di copertoni con carcassa in tela normale, e battistrada liscio. A complicare la situazione aiutò la complessa ragnatela dei brevetti, che proibiva in Francia ciò che da anni si sperimentava con successo in Inghilterra, e viceversa. In Francia, per esempio, si affermarono i pneumatici a tallone: i diritti di brevetto acquisiti dalla Pneumatic Tyre Company non erano infranti finché si restava in terra francese. Non appena però la si varcava, si contravveniva alla legge, perciò coloro che dovevano sostituire un pneumatico ad una vettura d'oltremania dovevano far ricorso ad una gomma a cerchiati, con conseguente disagio di conducente e passeggeri.

Nel 1904 i brevetti Welch scadettero. La Dunlop Rubber Company (che nel 1896 era succeduta alla Pneumatic Tyre Agency) tenne un pranzo di celebrazione durante il quale vennero simbolicamente bruciati i brevetti di Bartlett e di Welch.

Pionieri dell'applicazione della ruota pneumatica alla vettura automobile furono i due fratelli Michelin, André ed Edouard. Forti della loro esperienza nel campo della bicicletta (adottarono per la prima volta un pneumatico nella Parigi-Brest- Parigi del 1891, e fecero arrivare il loro pilota primo, con sole cinque forature), nel 1895 decisero di osare iscrivendosi alla gara automobilistica Parigi – Bordeaux, con una Daimler 4 CV. Non vinsero e neanche risultarono iscritti, (non si sa per quale disguido organizzativo), ma arrivarono al traguardo e, seppur avessero consumato l'intero treno di ventiquattro camere d'aria, l'esperienza fece scaturire in loro la convinzione che il pneumatico fosse la ruota del futuro. Tuttavia non tutti ne erano altrettanto convinti.

Queste alcune delle notizie riportate all'inizio del secolo dalla stampa, sia francese che britannica: "Una vettura Daimler ha coperto il viaggio da Coventry a Londra in 4 ore e cinquanta minuti, senza soste, su ruote piene". Il giorno dopo: "Le ruote pneumatiche sono praticamente una assoluta necessità per le vetture automobili, sia per il comfort sia per la velocità, e anche per la riduzione delle vibrazioni". Un altro giornale, lo stesso giorno: "A Parigi, lo studio di un ingegnere ha dimostrato che la ruota pneumatica si usura dopo 7.000 chilometri; la ruota piena dopo 15.000". Lo stesso giornale, un mese dopo: "I pneumatici sono desiderabili ma non necessari: Non vi è granché differenza tra guidare una Mors con ruote pneumatiche e guidarne una con ruote piene".

Il realista più del re: "La vettura del re monta gomme piene; ciò che soddisfa lui deve soddisfare chiunque". Vi erano anche, ed erano dei fanatici, i sostenitori della ruota elastica, una delle più esaltanti illusioni della storia dell'automobile. Consisteva in un cerchio in ferro rivestito di gomma piena e sostenuto da gruppi di molle. Ovviamente era assolutamente insopportabile il molleggio di una vettura così equipaggiata; eppure la polemica tra ruota elastica e pneumatico durò per quasi tutto il primo decennio del secolo, con pubblicità anche molto pesanti nei confronti dell'avversario. Ad onta di ciò, il pneumatico si affermò, come tutte le invenzioni veramente in grado di cambiare il mondo.

1.2.2 Caratteristiche del pneumatico e fasi di produzione

Inventato da Thomson nel 1846 e una seconda volta da John Boyd Dunlop nel 1888, equipaggia oggi la maggior parte dei mezzi di trasporto destinati ad un utilizzo su strada e, montato sulle ruote, permette l'aderenza del veicolo alla strada. Viene prodotto in molteplici tipi e misure per essere funzionali all'uso di biciclette, autovetture, autocarri, trattori, senza dimenticare l'utilizzo aeronautico nei carrelli d'atterraggio. Sono inoltre importanti gli utilizzi sportivi nelle varie competizioni motoristiche dove lo studio, alla ricerca delle migliori prestazioni, ha portato alla costruzione di pneumatici con mescole molto differenziate e alla scoperta di soluzioni tecniche investite in un secondo momento nell'industria dei pneumatici.

Per pneumatico (a seconda del tipo) s'intende l'insieme di:

- Tube Type: Una camera d'aria che racchiude l'aria compressa per ottenere un effetto di adattamento e sospensione del veicolo dal terreno. La copertura è costituita da gomma (in passato naturale, oggi sintetica), essenziale nel trasmettere e ricevere gli attriti radenti e volventi che si generano con il movimento, e tele di fibra o di metallo.

- Tubeless: La copertura è essenzialmente identica a quella tube type, ma possiede anche la funzione di camera d'aria (non ne richiede quindi l' utilizzo), se montata su una ruota appropriata.

La composizione strutturale di un pneumatico si identifica nei seguenti elementi:

- a) *Il battistrada (Tread)*: è la parte del pneumatico destinata al contatto con il terreno per assicurare l'attrito. Il disegno del battistrada è importante soprattutto per le superfici bagnate. La prima parte del battistrada, che viene a contatto con la superficie bagnata, serve ad allontanare l'acqua permettendo alla restante superficie drenata di fornire attrito necessario alla stabilità del veicolo. I canali, che vanno dal centro al bordo del battistrada, servono per espellere l'acqua. I pneumatici invernali hanno una composizione più morbida e una profondità del battistrada tale da permettere una maggiore trazione.
- b) *La carcassa (Casing)*: è la parte strutturale del pneumatico (comprendente la parte laterale) su cui è vulcanizzato il battistrada. La carcassa di un pneumatico da autovettura include la componente tessile, non presente invece nei pneumatici per autocarri. Questi ultimi inglobano una percentuale maggiore di acciaio;
- c) *La spalla (Sidewall)*: è la parte laterale della carcassa e assolve due compiti diversi: è flessibile in senso verticale per minimizzare il trasferimento delle irregolarità del terreno sul veicolo, mentre è relativamente rigida orizzontalmente per trasferire sul terreno i carichi dovuti a sottosterzo, frenata e accelerazione;
- d) *Le tele (Belts)*: è il piano, o i piani, di materiale messo in posizione centrale tra la carcassa e il battistrada.

Le caratteristiche geometriche dei pneumatici influenzano fortemente il loro comportamento su strada, alcuni dei fattori fondamentali si possono rilevare nei seguenti elementi distintivi:

- Il profilo del pneumatico: studiato a seconda delle esigenze a cui deve rispondere e al mezzo su cui va applicato, si può dividere in due tipi:
 - Normale, questi pneumatici sono studiati in modo da offrire la migliore guidabilità. Nel caso di pneumatici automobilistici, questi avranno un'unione tra spalla e battistrada arrotondato.
 - Sportivo, questi pneumatici sono studiati in modo da offrire la migliore tenuta. Nel caso di pneumatici automobilistici, questi avranno un'unione netta tra spalla e battistrada, in modo da massimizzare l'impronta a terra, anche se come inconveniente l'inserimento in curva risulta meno lineare/graduale.

- La larghezza del battistrada: è un parametro che influisce in vari modi a seconda della tipologia di pneumatico:
 - Motociclistico, maggiore sarà la sua larghezza, maggiore sarà la sua capacità di tenuta, ma si penalizzerà la velocità di cambio direzione e la tenuta su fondi bagnati .
 - Automobilistico, maggiore sarà la sua larghezza, maggiore sarà la sua capacità di tenuta, ma si penalizzerà la velocità di sterzata, di cambio direzione e la tenuta su fondi bagnati
- L' altezza spalla: maggiore sarà l'altezza della spalla e maggiore sarà la distanza tra il manto stradale e il cerchione. Questa caratteristica permette una maggiore deformazione del profilo dello pneumatico, migliorando l'assorbimento di fondi irregolari, smorzando l'effetto delle masse non sospese e riducendo l'intervento delle sospensioni/ammortizzatori, ma sfavorevolmente riduce la propria reattività su fondi duri e regolari quali le strade.
- Circonferenza della ruota: maggiore sarà tale valore e minore sarà l'effetto delle irregolarità del terreno, determinando un passaggio più morbido da un livello all'altro.

Oltre alle caratteristiche geometriche occorre evidenziare le proprietà fisiche del pneumatico che si distinguono in:

- Pressione del pneumatico: maggiore sarà la pressione e maggiore sarà la durezza del pneumatico, questo valore deve essere regolato in base al peso del veicolo, al tipo di strada da percorrere e tipo di pneumatico utilizzato: una pressione relativamente elevata è adatta a mezzi pesanti, strade lisce e dure e pneumatici con spalla bassa (come i tubolari delle bici da corsa).
- Aderenza dei pneumatici: l'aderenza dei pneumatici, come descritto dalla legge della fisica sull'aderenza, non è definita dalla larghezza dello stesso ma dal coefficiente d'aderenza del pneumatico, che viene definito in funzione della mescola. Il problema dell'aderenza dei pneumatici è dato dal fatto che il materiale a contatto con l'asfalto, tende a scaldarsi, soprattutto in condizioni d'utilizzo gravoso, come in curva e in frenata. Per questo motivo la larghezza del pneumatico deve possedere un valore minimo, altrimenti si rischia di surriscaldare il pneumatico e diminuire di conseguenza il coefficiente d'attrito. E' altrettanto vero che il pavimento stradale non ha sempre le stesse caratteristiche, quindi si possono avere delle zone di maggiore aderenza rispetto alle altre.

La composizione dei pneumatici da autovettura è diversa da quella di pneumatici da autocarro. Queste differenze non si esprimono solo in termini di dimensioni, di acciaio o tessile inclusi nella loro struttura, ma anche nei tipi e nelle proporzioni degli ingredienti usati nelle mescole di base. In particolare dette proporzioni sono date dal rapporto tra gomma naturale e sintetica nonché dal tipo di nerofumo o di silicio che sono richiesti per ottenere differenti proprietà dello pneumatico.

Il Grafico 1.2 mostrano la differenza di composizione tra pneumatici da automobili e autocarri.

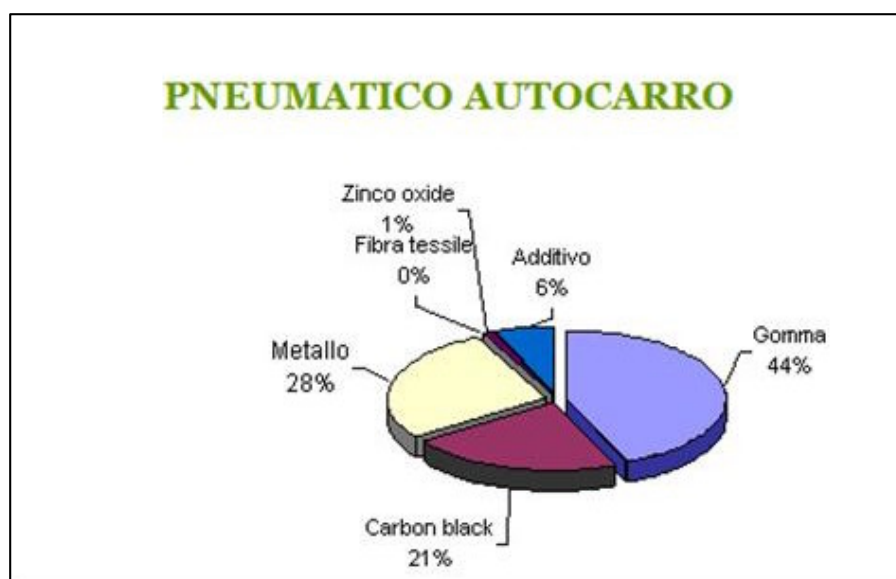
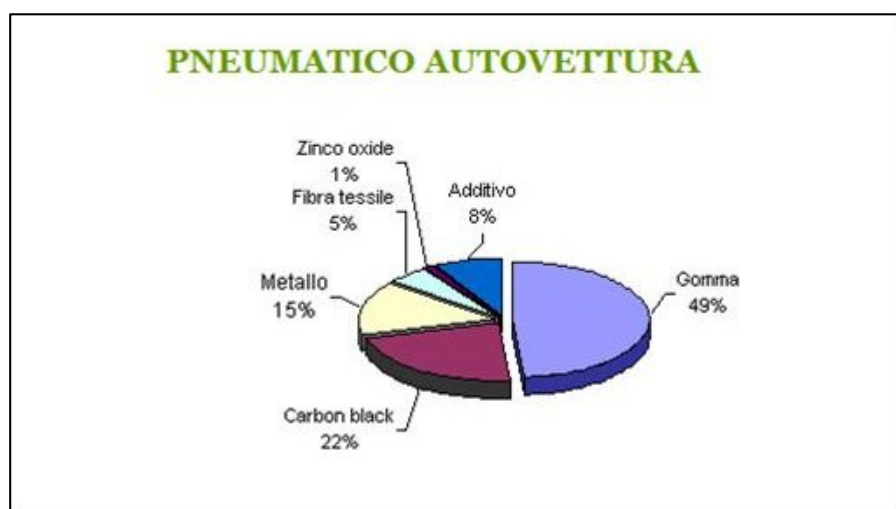


Grafico 1.2 - Composizione pneumatico: autovettura ed autocarro

Di seguito si riportano due tabelle (Tab. 1.1 e Tab. 1.2) riguardanti la composizione dei materiali e chimica dei PFU di un'autovettura.

Sostanza	Quota in % di peso	
Idrocarburi polimerici (essenzialmente caucciù sintetico e/o naturale)	46	
Fuliggine*)	20	
Acciaio	16	
Tessuto	6	
Ossido di zinco	3	
Zolfo	3	
Altre sostanze	6	*) una parte della fuliggine può essere sostituita dall'ossido di silicio
Totale	100	

Tab. 1.1 - Composizione materiale dei pneumatici usati

Elemento / lega	Tenore	Unità
Carbonio	ca. 70	%
Ferro	16	%
Idrogeno	7	%
Ossigeno	4	%
Ossido di zinco	1	%
Zolfo	1	%
Azoto	0,5	%
Acido stearico	0,3	%
Alogeni	0,1	%
Leghe di rame	200	mg/kg
Cadmio	10	mg/kg
Cromo	90	mg/kg
Nichel	80	mg/kg
Piombo	50	mg/kg

Tab. 1.2 - Composizione chimica dei pneumatici usati

Le materie prime che compongono il pneumatico, includono pigmenti, elementi chimici e fino a 30 diverse tipologie di gomma. L'insieme viene mescolato e fuso da un enorme "frullatore" chiamato Banbury, il quale opera ad altissime temperature e pressioni, ottenendo così un miscuglio nero e gommoso che verrà "macinato" più volte. La gomma raffreddata viene trasportata in di lastre alle macchine che provvederanno ad intagliarla, facendola passare attraverso fessure che la ridurranno in strisce utili per il fianco, per il battistrada e per le altre parti del pneumatico. Un'altro tipo di gomma viene utilizzata per costruire la carcassa. Sono possibili diversi tipi di costruzione: polyester, rayon o nylon. La forma definitiva del pneumatico e del battistrada è data dalla pressa (Fig. 1.14). Stampi incandescenti vulcanizzano, operando il disegno battistrada e le marcature sul fianco. I pneumatici vengono quindi "cotti" per 12/25 minuti, a seconda delle dimensioni.

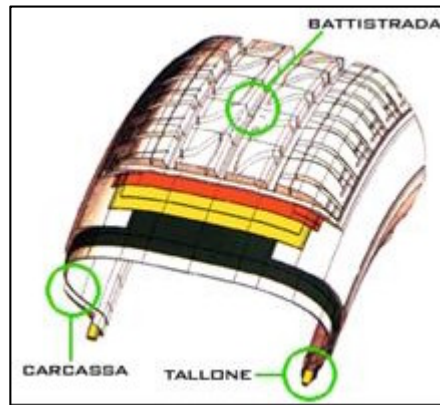


Fig. 1.14 - Elementi strutturali di un copertone

Gli elementi che caratterizzano un pneumatico sono quattro:

- il disegno del battistrada
- i codici di riconoscimento sui fianchi
- la struttura della carcassa e del battistrada
- la mescola della gomma con cui è fatto il pneumatico

Ciascun ingrediente della mescola (gomma/elastomeri, nerofumo, acciaio, tessile, ossido di zinco, zolfo e additivi chimici) contribuisce nel dare al pneumatico delle caratteristiche specifiche, al fine di favorirne una maggiore vita. Ogni parte del pneumatico è realizzata attraverso l'utilizzo di una particolare mescola. Il battistrada deve resistere all'usura e aderire al suolo, il fianco deve essere elastico, il tallone rigido, la carcassa deve sorreggere la struttura del pneumatico e una speciale mescola all'interno lo impermeabilizza.

2. ASPETTI LEGISLATIVI E TECNICI PER IL RECUPERO DEL PFU

2.1. Aspetti legislativi

Un aspetto di fondamentale importanza, ai fini del recupero e della valorizzazione dei pneumatici fuori uso (PFU), è innanzitutto la corretta attuazione della normativa vigente in materia. Il PFU rientra infatti nel campo di applicazione della “normativa rifiuti” e quindi, tutte le relative attività di trattamento, recupero e/o smaltimento debbono essere effettuate nel pieno rispetto della legislazione vigente. La tematica rifiuti è tuttavia una tematica complessa dal punto di vista giuridico, anche in relazione al fatto che la stessa normativa comunitaria e nazionale è sempre in continua evoluzione ed aggiornamento. Numerose sono le Direttive e i Regolamenti emessi a livello comunitario, tuttavia solo in parte attuati nel nostro ordinamento giuridico (spesso con ritardi ingiustificati). Ad oggi i principali riferimenti nazionali in tale ambito sono il Testo Unico Ambientale D.lgs 152/2006 e il D.lgs 36/2003 sulle discariche.

Per quanto attiene i pneumatici al fine del loro recupero, trattamento o smaltimento, si tratta innanzitutto di vedere se rientrano o meno nella definizione di **rifiuto** (art. 183 lettera a - D.lgs 152/2006): *qualsiasi sostanza od oggetto che rientra nelle categorie riportate nell'allegato A alla parte quarta del presente decreto e di cui il detentore si disfi o abbia deciso o abbia l'obbligo di disfarsi*. In tal caso, se rientra in tale definizione, si incorre in numerosi adempimenti amministrativi formali (registri, formulari, MUD, ecc...). Sarebbe pertanto “bene” che il PFU non rientrasse in tale definizione ma, piuttosto, in quella di sottoprodotto o materia prima seconda (MPS).

Sono **sottoprodotti** (art. 183 lettera p - D.lgs 152/2006): *le sostanze ed i materiali dei quali il produttore non intende disfarsi ai sensi dell'articolo 183, comma 1, lettera a), che soddisfino tutti i seguenti criteri, requisiti e condizioni: 1) siano originati da un processo non direttamente destinato alla loro produzione; 2) il loro impiego sia certo, sin dalla fase della produzione, integrale e avvenga direttamente nel corso del processo di produzione o di utilizzazione preventivamente individuato e definito; 3) soddisfino requisiti merceologici e di qualità ambientale idonei a garantire che il loro impiego non dia luogo ad emissioni e ad impatti ambientali qualitativamente e quantitativamente diversi da quelli autorizzati per l'impianto dove sono destinati ad essere utilizzati; 4) non debbano essere sottoposti a trattamenti preventivi o a trasformazioni preliminari per soddisfare i requisiti merceologici e di qualità ambientale di cui al*

punto 3), ma posseggano tali requisiti sin dalla fase della produzione; 5) abbiano un valore economico di mercato.

Sono **MPS** (art. 183 lettera q - D.lgs 152/2006): *le sostanza o materia avente le caratteristiche stabilite ai sensi dell'articolo 181-bis. Ovvero: Non rientrano nella definizione di cui all'articolo 183, comma 1, lettera a), le materie, le sostanze e i prodotti secondari definiti dal decreto ministeriale di cui al comma 2, nel rispetto dei seguenti criteri, requisiti e condizioni: a) siano prodotti da un'operazione di riutilizzo, di riciclo o di recupero di rifiuti; b) siano individuate la provenienza, la tipologia e le caratteristiche dei rifiuti dai quali si possono produrre; c) siano individuate le operazioni di riutilizzo, di riciclo o di recupero che le producono, con particolare riferimento alle modalità ed alle condizioni di esercizio delle stesse; d) siano precisati i criteri di qualità ambientale, i requisiti merceologici e le altre condizioni necessarie per l'immissione in commercio, quali norme e standard tecnici richiesti per l'utilizzo, tenendo conto del possibile rischio di danni all'ambiente e alla salute derivanti dall'utilizzo o dal trasporto del materiale, della sostanza o del prodotto secondario; e) abbiano un effettivo valore economico di scambio sul mercato.*

Qualora infatti si rientrasse in una di queste definizioni, il PFU sarebbe un “non rifiuto” e le procedure amministrative/gestionali si semplificherebbero notevolmente, soprattutto per le aziende che intendono intraprendere tale attività di recupero/valorizzazione.

Un altro concetto di particolare rilievo, relativo ai principi generali di prevenzione fin dall'origine della produzione dei rifiuti, è contenuto nel testo Unico Ambientale D.lgs 152/2006 (art. 178 comma 3): *la gestione dei rifiuti è effettuata conformemente ai principi di precauzione, di prevenzione, di proporzionalità, di responsabilizzazione e di cooperazione di tutti i soggetti coinvolti nella produzione, nella distribuzione, nell'utilizzo e nel consumo di beni da cui originano i rifiuti, nel rispetto dei principi dell'ordinamento nazionale e comunitario, con particolare riferimento al principio comunitario "chi inquina paga". A tal fine la gestione dei rifiuti è effettuata secondo criteri di efficacia, efficienza, economicità e trasparenza.*

Lo stesso D.lgs 152/2006 richiama proprio i Pneumatici fuori uso all'art. 228. In particolare si evidenzia che, al fine di ottimizzare il recupero dei pneumatici fuori uso e per ridurre la formazione anche attraverso la ricostruzione, è fatto obbligo ai produttori e importatori di pneumatici di provvedere, singolarmente o in forma associata e con periodicità almeno annuale, alla gestione di quantitativi di pneumatici fuori uso pari a quelli dai medesimi immessi sul mercato e destinati alla vendita sul territorio nazionale.

Obblighi non certo di poca rilevanza per i produttori, che si vedono “accollati” gli oneri di post utilizzo del pneumatico da loro stessi prodotto.

E' chiaro infatti che, in un bilancio di massa annuale così come prescritto, tanti pneumatici vengono immessi sul mercato e tanti vengono dimessi (a meno delle quantità stoccate temporaneamente in depositi/magazzini). La legge impone quindi come prima priorità il controllo effettivo delle quantità di PFU realmente prodotto.

Concetto tuttavia semplice e, apparentemente, di facile applicazione se non si sapesse che ogni anno in Italia "spariscono" milioni di tonnellate di rifiuti per un business di svariati miliardi di euro.

Risulta chiaro che gli obblighi imposti dal D.lgs 152/2006 sono facilmente attuabili, in realtà, non tanto da ogni singolo produttore ma, piuttosto, da società consortili a cui possono aderire i singoli produttori.

A tal proposito è di recente istituzione il consorzio nazionale Ecopneus scpa, la società consortile per il rintracciamento, la raccolta, il trattamento e la destinazione finale dei Pneumatici Fuori Uso, creata proprio dai principali produttori di pneumatici operanti in Italia in base all'art. 228 del Decreto Legislativo 152/2006.

Il ruolo del consorzio si inserisce tra l'altro in un contesto legislativo particolare, in quanto con l'entrata in vigore del D.lgs 36/2003 i pneumatici non possono più essere smaltiti in discarica. In base a tale decreto infatti (art 6 – rifiuti non ammessi in discarica) non sono più ammessi in discarica i pneumatici interi fuori uso a partire dal 16 luglio 2003, esclusi i pneumatici usati come materiale di ingegneria ed i pneumatici fuori uso triturati a partire da tre anni da tale data, esclusi in entrambi i casi quelli per biciclette e quelli con un diametro esterno superiore a 1400 mm. Tuttavia tale decreto ha subito numerose proroghe.

Con L. 13/2009 (di conversione del Decreto-Legge n. 208/2008) è stata modificata per la quinta volta la data di scadenza per l'applicazione dei criteri di ammissibilità dei rifiuti in discarica stabiliti dal D.lgs. 36/2003. Dopo aver fissato il termine originario al 16 luglio 2005 con D.lgs 36/2003 e aver prorogato per la prima volta la scadenza al 31 dicembre 2005, il legislatore non è mai mancato all'appuntamento fatidico, prolungando puntualmente, ogni anno, il termine di adeguamento di ulteriori 12 mesi, fino ad arrivare all'ultimo rinvio al 31 dicembre 2009.

Si può dire se non altro che tali continue e successive proroghe hanno dato più tempo alle aziende del settore per organizzarsi e strutturarsi per il raggiungimento dei nuovi obblighi legislativi. Certo l'Italia non primeggia in tali adempimenti in quanto, alla fine del 2006, l'obiettivo zero pneumatici usati in discarica (fissato dall'Unione Europea) era stato raggiunto solo da Austria, Danimarca, Finlandia, Francia, Lussemburgo, Paesi Bassi e Svezia.

2.2. Analisi del mercato del PFU in Europa e in Italia

Obiettivo particolarmente importante che si sono posti consorzi e associazioni di settore, è quello di avere un quadro chiaro e completo sui flussi dei pneumatici sia a livello europeo che in Italia. Ciò infatti costituisce la premessa per poter fare delle corrette valutazioni ed analisi sulla disponibilità dei materiali da valorizzare.

Tuttavia, come avviene anche con le diverse tipologie di rifiuti, pure i pneumatici rientrano spesso nei circuiti della non legalità. E' chiaro dunque che conoscere l'esatto quantitativo dei flussi spesso diventa un obiettivo di stima più che un effettivo dato reale.

In Europa sono 12 i grandi produttori di pneumatici: Bridgestone Europe, Continental, Cooper Tires, Goodyear Dunlop Tires Europe, Marangoni, Michelin, Mitas, Nokian Tyres, Pirelli Tyre, Trelleborg Wheel Systems, Hancock e Vredestein. In 90 impianti si producono ogni anno 355 milioni di pneumatici, ovvero il 24% della produzione mondiale.

Il tasso di raccolta è aumentato costantemente negli ultimi 15 anni, favorendo la nascita di prodotti innovativi sia per le industrie sia per i consumatori e contribuendo a creare un mercato sostenibile per i derivati dei PFU.

In Europa esistono 3 sistemi diversi di gestione del PFU:

- Sistema a tassazione
- Libero mercato
- Responsabilità del produttore

In particolare in Tab. 2.1 vengono descritte le relative modalità e i paesi aderenti.

I produttori di pneumatici europei hanno interpretato la crescita del recupero di materiale come un incoraggiamento a proseguire nella strada della *Producer Responsibility*, iniziata alla fine degli anni '90 in anticipo sugli orientamenti che sono poi stati dati dall'Unione Europea (Fig. 2.1). Per ERTMA, l'Associazione europea dei produttori di pneumatici e gomme, l'estensione di tale schema anche in Italia porterà sicuramente ulteriori benefici.

Sistema a tassazione	Ciascun Paese è responsabile per il recupero e il riciclo dei PFU. I produttori pagano una tassa allo Stato che è responsabile globalmente dell'organizzazione e remunera gli operatori nella catena del recupero. La tassa viene successivamente applicata al consumatore.	Vige in Danimarca, Slovacchia e Slovenia.
Libero mercato	La legge stabilisce gli obiettivi da raggiungere ed i referenti per i singoli settori di attività ma non prevede il responsabile di filiera. In tal modo tutti gli operatori del sistema stipulano contratti secondo le condizioni del libero mercato e agiscono in conformità con la locale legislazione sui rifiuti.	Vige in Austria, Bulgaria, Croazia, Germania, Irlanda, Svizzera e Regno Unito.
Responsabilità del produttore	La legge definisce l'assetto legale e conferisce la responsabilità ai produttori di organizzare la gestione dei PFU. E' possibile la costituzione di una società senza scopo di lucro per gestire i PFU attraverso le soluzioni più economiche. I produttori hanno l'obbligo di monitorare e rendicontare alle autorità nazionali.	Vige in Norvegia, Paesi Bassi, Svezia, Belgio, Finlandia, Estonia, Francia, Polonia, Portogallo, Ungheria, Romania, Spagna, Grecia, <i>Italia</i> .

Tab. 2.1 – Descrizione dei sistemi di gestione PFU in Europa (fonte Ecopneus)



Fig. 2.1 – Mappa dei sistemi di gestione del PFU in Europa (fonte Ecopneus)

Per quanto attiene i quantitativi e i flussi di PFU, i dati risultano aggiornati all'anno 2007. In tale anno infatti sono stati generati circa 2.7 milioni di tonnellate di PFU, di cui il 91% è stato avviato a recupero, confermando l'Europa una delle aree più attive al mondo nel recupero dei PFU (fonte Ecopneus). Particolare importanza assume quindi la relativa destinazione del PFU a livello europeo, riportata in Tab. 2.2.

A livello dell'UE, la commissione europea di standardizzazione (CEN) ha riorientato, nel 2007, le attività del Tyre Recycling Project Committee (CEN/PC 366) verso l'obiettivo di definire metodi e requisiti specifici per il ciclo del riciclaggio di pneumatici, sia per quanto riguarda il riutilizzo, sia per prodotti derivati che per altre applicazioni.

Per quanto attiene l'Italia si stima che ad oggi siano circa 30.000 i punti in cui viene generato il PFU: gommisti, stazioni di servizio, officine, sedi di flotte su tutto il territorio nazionale. Migliaia sono poi le aziende autorizzate al prelievo e trasporto, con destinazione agli oltre 60 impianti di trattamento, siti in cui i PFU vengono preparati per il successivo recupero energetico o di materiale.

		1994	1996	1998	2000	2002	2004	2006	2007
PFU in Europa	Riuso-export	11%	8%	11%	10%	11%	9%	9%	9%
	Ricostruzione	10%	12%	11%	11%	11%	12%	12%	11%
	Recupero di materiale	6%	11%	18%	19%	25%	28%	34%	39%
	Recupero energetico	11%	20%	20%	21%	27%	31%	32%	32%
	Discarica	62%	49%	40%	39%	26%	20%	13%	9%
N° di gestori di PFU		1	3	4	4	7	11	13	15

Tab. 2.2 – Gestione del PFU in Europa dal 1994 al 2007 (Fonte: ETRMA)

La principale destinazione del PFU in Italia, aggiornata all'anno 2007, è riportata nel Grafico 2.1. Come si nota, dall'anno 1992 al 2007, c'è stata un'inversione di tendenza che ha visto sostanzialmente favorire il recupero di materia piuttosto che lo smaltimento o la discarica.

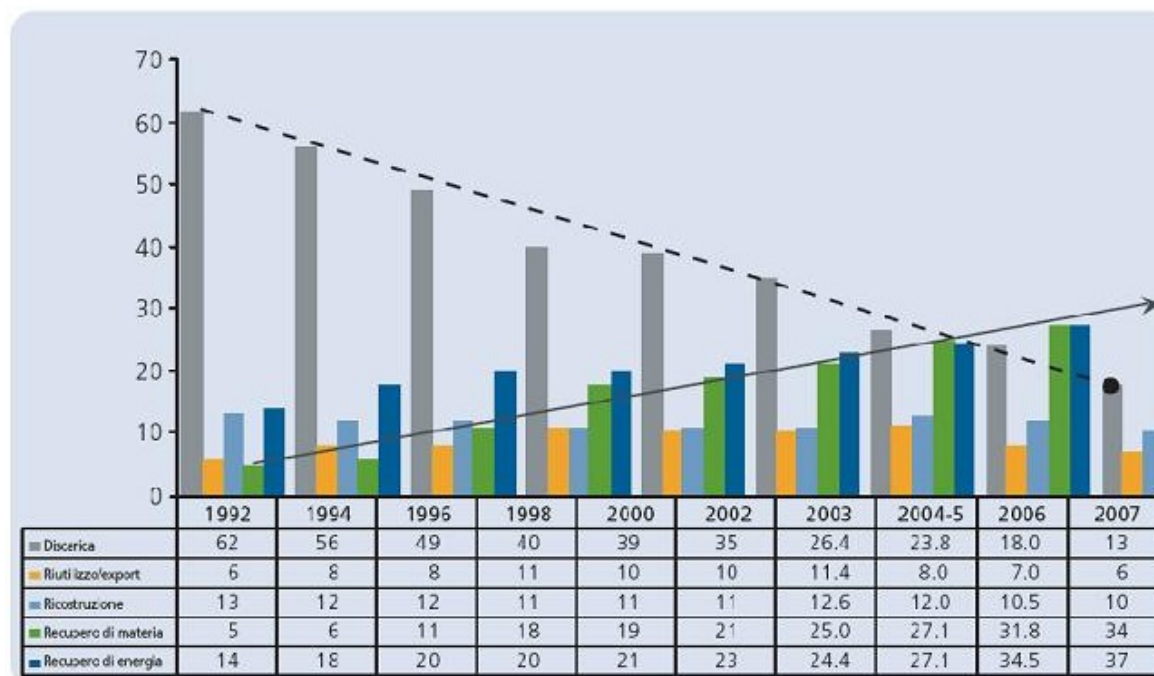


Grafico 2.1 - Destinazione finale dei PFU in Italia negli anni 1992-2007 (fonte ETRA)

Se si confrontano i dati nazionali con i dati europei, relativi all'anno 2007, possono formularsi le seguenti considerazioni:

- la quota destinata al recupero energetico è superiore alla media europea;
- la percentuale destinata alla ricostruzione è più o meno in linea con la media europea;
- la quota di recupero di materia prima risulta inferiore alla media europea;
- la quota di riutilizzo/export risulta di poco inferiore alla media europea;
- la percentuale destinata alla discarica, stoccaggi o destinazioni non censite, risulta superiore rispetto alla media europea.

Da tali dati si evince come il mercato del pneumatico appaia sostanzialmente stabile, ma dato l'enorme potenziale a tutt'oggi inespresso, emerge la necessità, da parte degli operatori del settore, di mirati interventi che favoriscano sbocchi commerciali per i materiali ottenuti dal riciclaggio degli pneumatici.

L'ambizione dei settori dei pneumatici e della gomma è quella di rafforzare ulteriormente la lenta crescita del mercato dei materiali derivanti da PFU con prodotti solidi e processi standardizzati. L'obiettivo di adottare standard europei è di contribuire ad un sostanziale incremento della qualità dei prodotti derivanti da pneumatici a fine vita, aprendo il mercato a nuove applicazioni. Standard armonizzati aiuterebbero anche a promuovere scambi tecnologici, migliorare l'accesso all'abilità tecnica e all'innovazione e proteggere l'ambiente. Un libero accordo commerciale dovrebbe essere di beneficio per tutte le parti per ottenere “un campo di gioco” equo tra le parti interessate, nella piena coerenza con le regole dell'organizzazione del mercato mondiale (WTO).

A questo fine ci si dovrebbe muovere verso una più approfondita integrazione economica tra le parti in causa, attraverso la progressiva eliminazione di tutte le forme di barriere del commercio per quanto riguarda beni, servizi ed investimenti, incluse misure tariffarie e non tariffarie.

2.3. Valorizzazione del PFU e modalità di recupero

Il mercato del PFU e dei materiali, negli ultimi anni, ha subito una crescita esponenziale in virtù di una vasta disponibilità di materia e perchè concorrenziali con i prodotti tradizionali. I governi e le industrie stanno prendendo consapevolezza dei potenziali benefici che possono derivare dall'utilizzo di questi materiali, al fine di azzerare il quantitativo di pneumatici attualmente smaltiti in discarica.

Contrariamente ad altri tipi di rifiuti quali ad esempio i contenitori di vetro, gli imballaggi, i metalli e la carta, gli pneumatici usati sono difficili da riciclare.

Il riciclaggio completo, che consisterebbe nel processare gli pneumatici usati per ottenere materie prime, non è attualmente possibile a causa delle difficoltà incontrate nei pretrattamenti di completa devulcanizzazione (rottura dei legami del carbonio con lo zolfo) della gomma.

Tra i vari possibili procedimenti di riciclo, le tecnologie di trattamento termico, incenerimento, gassificazione e pirolisi, rappresentano una possibile alternativa alla discarica, favorendo il recupero di materia e/o energia dagli pneumatici fuori uso. Tra le tecnologie di trattamento più diffuse in Italia abbiamo la granulazione a temperatura ambiente, ma anche la granulazione criogenica (o criogenia) sta cominciando ad affermarsi.

■ La granulazione a temperatura ambiente

In questa tecnologia tutte le fasi di triturazione e granulazione vengono effettuate a temperatura ambiente. E' un processo di macinazione meccanica che avviene per fasi successive.

Possono essere trattati indifferentemente pneumatici di autocarri, di auto e scarti di articoli in gomma ed il processo è normalmente finalizzato alla produzione di granulato e polverino con un trattamento differenziato, a seconda che si ottengano detti prodotti da pneumatici di auto o di autocarro. Durante le varie fasi di macinazione, mano a mano che si riduce la dimensione del prodotto, si provvede a separare ed asportare in uno o più momenti successivi il metallo e la fibra tessile. L'assenza di trattamenti chimici o termici, mantiene inalterata la struttura molecolare del materiale polimerico. Le operazioni di taglio con lame metalliche sono predominanti e vengono effettuate a stadi successivi riducendo la dimensione della gomma di stadio in stadio.

La vagliatura permette quindi di ottenere prodotti classificati in maniera diversa per corrispondere alle specifiche richieste dall'applicazione. La ruvidità della superficie è prevalentemente correlata allo stato di usura delle lame durante il processo produttivo. Lame nuove e affilate permettono di ridurre la ruvidità del granulato se paragonato a quello ottenuto con lame consumate. Nel caso di un prolungato utilizzo delle lame la vita dell'unità di granulazione si ridurrebbe notevolmente. La forma cubica di granulato facilita l'intasamento delle fibre dell'erba sintetica e fa sì che non si attacchi agli indumenti dei calciatori.

■ La granulazione criogenica

Il materiale in ingresso dalla fase di macinazione viene raffreddato a -80° o più, utilizzando dell'azoto liquido e portando la gomma in fase vetrosa. Questa non è una transizione vera e propria transizione di fase ma con questo termine si indica che la gomma diviene fragile a tal punto da poter essere facilmente rotta ed esempio con mulini a pioli o a martelli.

Le particelle di gomma, osservate al microscopio, hanno una superficie più uniforme se confrontate con quelle ottenute con la granulazione a temperatura ambiente. La superficie piana

del granulato riduce la superficie totale facendo risultare più cubica la sua forma. La pezzatura del granulo rispetto alla lavorazione a temperatura ambiente risulta più fine, tendenzialmente più pulito e utilizzabile in applicazioni più sofisticate.

Attualmente meno dell' 1% di granulati di gomma per intasamento vengono prodotti con la tecnologia criogenia in Europa (esempio di mulini granulatore e polverizzatore (Foto 2.1 e Foto 2.2). Le ragioni sono le seguenti: la tecnologia criogenia è molto più vantaggiosa economicamente per produrre granulati, o meglio polverini, di dimensioni inferiori a 0,4 mm; l'azoto liquido è abbastanza costoso e deve essere usato in quantità notevole durante il processo produttivo; il prezzo medio dei granulati da intasamento di dimensioni comprese tra 0,5 e 2,2 mm è attualmente del 130% superiore a quello ottenuti con il processo a temperatura ambiente. Si tratta di due processi industriali che richiedono peraltro investimenti di rilievo e che vanno da 1,5 a 5 milioni di euro, impianti complessi e delicati, che incorporano tecnologia specifica ed esclusiva. Detti impianti, in caso di blocco dell'attività non sono riconvertibili verso altre produzioni e quindi devono essere dismessi, con rilevanti danni economici, perdita di posti di lavoro e negative conseguenze sulle aziende utilizzatrici.



Foto 2.1 - Esempio di mulino granulatore



Foto 2.2 - Esempio mulino polverizzatore

Sicuramente una proposta interessante per il completo recupero del PFU è stata messa a punto dal Consorzio Ecopneus (Fig. 2.2), che ne prevede la completa attuazione già a partire dall'anno in corso.

In modo sintetico si può dire che le principali forme di recupero dei pneumatici usati sono mirate all'ottenimento di:

- 1) pneumatici ricostruiti;
- 2) materiali reimpiegabili in diversi cicli di produzione e/o di consumo;
- 3) energia.

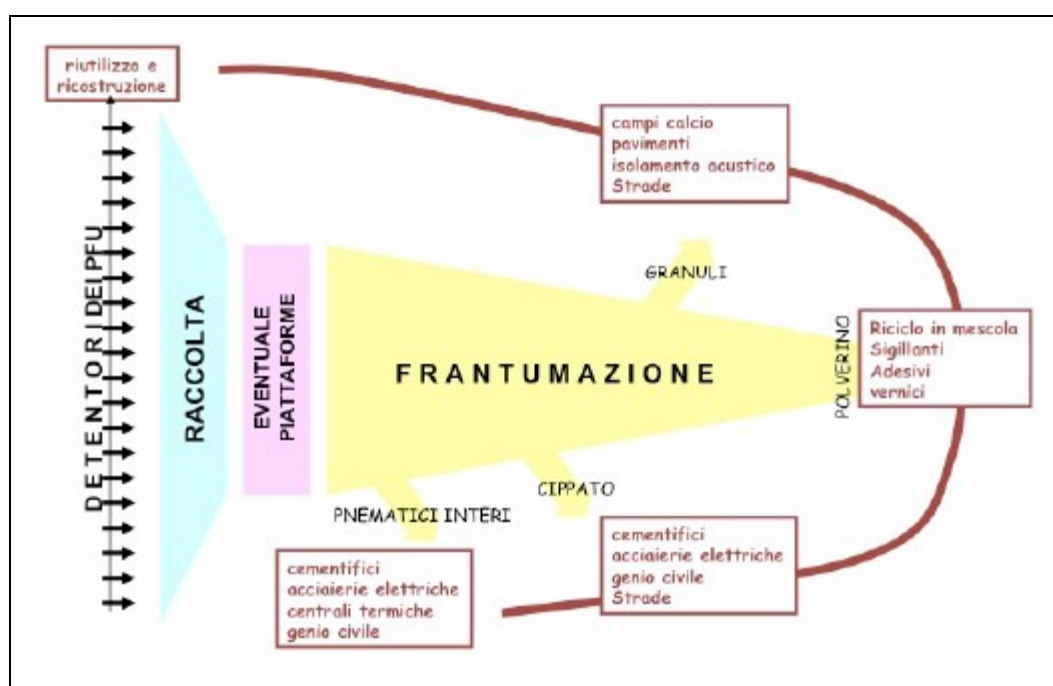


Fig. 2.2 - Flussi e dinamiche del sistema di gestione integrato dei PFU (fonte: Ecopneus)

2.3.1 Ricostruzione del pneumatico

Al termine del ciclo di vita del pneumatico nuovo, che salvo casi particolari, si verifica quando la profondità del battistrada induce l'utente alla sostituzione e che deve essere comunque fatta in ogni caso quando il battistrada raggiunge la minima profondità di legge, la carcassa può possedere ancora tutti i requisiti di sicurezza per essere reimpiegata per la stessa funzione per la quale è stata progettata, previa ricostruzione del battistrada.

Non solo, anche dopo la prima ricostruzione, il pneumatico usurato, soprattutto per applicazioni su veicoli industriali, può essere successivamente ricostruito. La ricostruzione è il metodo di recupero più nobile in quanto valorizza maggiormente lo pneumatico usato reintroducendolo nel medesimo ciclo di consumo allungandone così il proprio ciclo di vita.

La ricostruzione è un processo che prevede la rigenerazione del battistrada del pneumatico usurato. Il ciclo di lavorazione è composto dalle seguenti fasi: controllo di conformità della carcassa mediante ispezione visiva, eventuale riparazione, eventuale essiccazione, rimozione mediante rasatura del battistrada residuo, ricostruzione del nuovo battistrada che può avvenire con procedimenti a caldo con sistema di vulcanizzazione a stampo oppure con procedimento a freddo impiegando bande prevulcanizzate.

2.3.2 Recupero di materia

I pneumatici sono da considerare un'ottima risorsa, nell'ottica dello sviluppo sostenibile, poiché hanno una vita media superiore ai 50 anni e delle proprietà intrinseche da non sottovalutare, tra cui lo sviluppo batterico rallentato, la resistenza alla muffa, al caldo e all'umidità, alla luce del sole o ai raggi ultravioletti come pure agli olii, agli acidi e ad altri prodotti chimici; hanno inoltre proprietà elastiche e resistono bene agli urti.

A seconda della pezzatura ottenuta dai PFU variano le materie prime secondarie derivate e di conseguenza il loro nuovo utilizzo. Quantità di materiali di granulometria maggiore, cioè pneumatici interi, triturati e chip, ben si prestano per applicazioni tipiche dell'ingegneria civile. Quantità di materiali più piccoli, cioè granulato e polverino, trovano applicazione nel mercato dell'autoricambio, nelle mescole per bitumi o vernici.

Il polverino ed il granulato di gomma sono due consolidati prodotti industriali e più precisamente due materie prime secondarie derivanti dall'attività di recupero di pneumatici fuori uso. La produzione di polverino e granulato di gomma nasce storicamente dallo stesso settore di lavorazione di manufatti in gomma, cui fornisce una vera e propria materia prima secondaria. Negli ultimi anni si è assistito ad un'espansione dei suoi impieghi in molteplici e svariati settori.

Pneumatici interi

I pneumatici interi sono utilizzati in una varietà di applicazioni ingegneristiche grazie alle loro caratteristiche fisiche. Confrontati con i materiali tradizionali, i pneumatici hanno un peso minore, elevata capacità di drenaggio, sono relativamente comprimibili ed hanno una bassa conducibilità termica. Sono particolarmente adatti per installazioni su suoli umidi o instabili i quali richiedono il minor carico possibile, sono riciclabili senza trasformazione fisica o chimica, e possono essere tagliati a metà o in quarti. Alcuni esempi di applicazione del pneumatico intero sono:

- **Barriere antirumore:** attualmente dislocate su circa 3.000.000 km di strade dell'UE. Si rileva che il livello sonoro che viene raggiunto, nelle zone limitrofe alle autostrade ed a quelle altamente trafficate, è di circa 70 - 85 dB(A); l'utilizzo di barriere permette di abbattere questo valore di 10 dB(A) permettendo così di ottenere livelli sonori tali da non provocare fastidio e

disturbo alla popolazione. Le barriere vengono spesso costruite su terreni morbidi, paludosi o altrimenti instabili sui quali non sarebbe possibile costruire barriere tradizionali ma bisogna ricorrere a materiali alternativi. Queste applicazioni sono state installate con successo nell'UE, in particolar modo in Scandinavia e Finlandia.

- **Barriere Artificiali:** comprendono barriere marine, sistemi di protezione della costa, frangiflutti. Usate fin dal 1960 particolarmente nel Pacifico del Sud e Asia. Alcune installazioni richiedono che i pneumatici debbano essere riempiti con cemento marino e tra loro ancorati (Foto 2.3). Data la loro struttura inerte, i pneumatici sono facilmente colonizzati dalle alghe, coralli e crostacei. Studi hanno confermato una piccola quantità di lisciviazione da metalli pesanti e composti organici.



Foto 2.3 – Applicazioni del PFU come barriere artificiali

- **Balle:** utilizzate in USA negli anni ottanta hanno ottenuto consensi positivi grazie alla loro leggerezza in confronto con i materiali tradizionali e perchè possono essere utilizzati per il ripristino di aree sensibili come pendii erosi, corsi d'acqua e dighe. Tali manufatti pesano circa 1/5 del peso del cemento, 1/7 rispetto alla ghiaia e 1/3 del terreno, costituendo un'alternativa efficace per queste aree. Sono infatti prodotti non biodegradabili, il che ne permette una durata di vita a lungo termine. Recentemente sono stati testati come surrogati della ghiaia e nelle fondazioni di pietrame nella costruzione di strade.

Triturato e chips

Sono prodotti leggeri, relativamente comprimibili e addensabili, utilizzati sotto pressioni laterali basse, presentano bassa conducibilità termica ed assicurano elevato drenaggio rispetto ad altri materiali. Il triturato (Foto 2.4) è costituito da pneumatici frammentati meccanicamente, strappati o lacerati in pezzi di circa 50-300 mm; è di fatto non biodegradabile, anche se i fili di acciaio, sommersi da acqua in modo continuo e funzione delle condizioni specifiche di pH, possono dissolversi. Studi indicano che sotto queste condizioni la lisciviazione dello zinco genera livelli di concentrazione non significativi.



Foto 2.4 - Triturato di pneumatici (circa 50-300 mm)

I chip sono invece pneumatici frammentati meccanicamente, lacerati o strappati, irregolarmente modellati in dimensioni di circa 10-50 mm (Foto 2.5). I principali utilizzi includono: riempimenti leggeri per costruzioni comuni, riempimenti, drenaggi, sottofondi di pavimentazione stradale, costruzione e manutenzione di discariche, piedritti dei ponti e prodotti agricoli.



Foto 2.5 – Chip di pneumatico frammentato meccanicamente (circa 10-50 mm)

Il triturato viene utilizzato in numerosi progetti negli USA, Canada, Asia (particolarmente in Corea), Australia e Sud Africa. Mentre il mercato nell'UE è ancora piccolo, ma in crescita costante.

I principali utilizzi includono: riempimenti leggeri per la costruzione di strade, dighe, scarichi, isolamento termico in strade/edifici, barriere acustiche, costruzione di discariche.

Alcune delle principali applicazioni sono:

- **Materiale di riempimento leggero:** è il segmento di mercato maggiore per il triturato. E' largamente utilizzato per sottofondi stradali e tranviari, piani anti-shock, per superfici sportive e più recentemente per sottofondi di condotte. Il triturato è utilizzato per stabilizzare il terrapieno delle spalle dei ponti, particolarmente su suoli facilmente comprimibili o di argilla. E' l'alternativa principale a materiali tradizionali come l'argilla espansa, LECA e aggregati di cava, argillite, suoli o ghiaia quando il peso eccessivo potrebbe generare instabilità. Utilizzato come materiale di riempimento per muri di sostegno e per le testate dei ponti, il triturato riduce la pressione sul muro diminuendo il rischio di cedimenti e rotture. Utilizzato anche come materiale anti-shock sulle superfici di parchi gioco e come antivibrante. Il mercato durante gli ultimi sette anni è aumentato del 25% con segnali di crescita continua anche per i prossimi anni.

- **Materiale per Drenaggio:** questa tipologia possiede molteplici proprietà che favoriscono queste applicazioni, tra le quali: drenaggio eccellente, elevata resistenza chimica, durevolezza nel tempo. E' di importanza strategica nelle vicinanze di autostrade, raccordi ed ingressi stradali ed in curve piane o inclinate. Quasi tutte le superfici fisse, inclusi i campi da gioco, campi sportivi, ecc, richiedono appropriate qualità di drenaggio per conservare integra, nel tempo, la superficie. L'utilizzo di questo materiale permette un ottimo drenaggio e, quindi, facilita l'espulsione dell'acqua.
- **Isolanti:** generalmente utilizzati per ottenere isolamento da stress termici (per strade e superfici sportive), vibrazioni (indotto da treni e metropolitane, applicazioni fatte in Italia) e rumore. Rappresenta un segmento di mercato in continua crescita.

Granulato

Il granulato è il risultato del processo di riduzione degli pneumatici in particelle finemente disperse di circa 1-10 mm (Foto 2.6). In questa gamma di pezzatura sono compresi diversi intervalli granulometrici, a seconda dell'applicazione finale. I principali utilizzi includono: ruote solide, materassi per bestiame, piastrelle per pavimenti, materiali per la copertura dei tetti, antivibranti, articoli per segnaletica stradale, superfici e sottostrati per la sicurezza e per impianti sportivi, conglomerati, pavimentazioni sportive, asfalti di gomma, cordoli stradali, barriere stradali, attenuatori d'urto.



Foto 2.6 – Granulato di PFU (circa 1-10 mm)

Il granulato è utilizzato in diverse industrie e anch'esso ha numerose applicazioni tra cui:

- **Superfici sportive e da gioco:** include: campi da hockey e calcio, piste di atletica, campi da tennis, manti erbosi artificiali, campi equestri e parchi gioco per bambini. I requisiti richiesti per tali applicazioni sono: colore, comprimibilità, durabilità, elasticità, drenaggio, attenuazione degli impatti, basso contenuto di umidità. L'utilizzo del granulato migliora: la sicurezza, l'assorbimento agli urti, l'affaticamento del giocatore e della probabilità di generare infortuni migliorando il rendimento del gioco. E' stimato che nell'UE vengono costruiti annualmente superfici sportive per un'equivalente metratura di 2 milioni di metri quadri, ciascuno dei quali

potrebbe utilizzare approssimativamente 50-80 kg/m² di granulato come materiale da riempimento o per coperture. In alcuni Stati, viene previsto dalla legislazione che le zone dedicate al gioco nelle scuole obbligatorie e nei parchi gioco comunali, siano costruite utilizzando materiale anti-shock. Nelle installazioni di campi sportivi, ad esempio per superfici solide, il granulato è comunemente legato con la vulcanizzazione ad umido di materiale poliuretano o bitumi di polimero modificati.

- Campi da calcio di terza generazione: di progettazione statunitense, l'erba sintetica arriva in Italia verso la fine degli anni settanta con la realizzazione dei primi impianti. Sostanzialmente si trattava di un tappeto realizzato con fibre sintetiche di altezza variabile dai 17 ai 40 mm, tessute su un supporto in poliestere e successivamente saldate sul dorso con una spalmatura di lattice. Successivamente, ci fu la sperimentazione di nuove soluzioni tecniche e l'utilizzo di filati diversi: dal polipropilene al poliammide dalle fibre ibride di poliolefine al polietilene. Successivamente a questi anni di sperimentazione, l'uso delle superfici in erba sintetica per la realizzazione di impianti adibiti al gioco del tennis e del calcetto, è diventato una consuetudine. L'erba sintetica, durante la sua evoluzione, è arrivata ad essere considerata anche in realtà più grandi con la messa a punto dei cosiddetti tappeti di "terza generazione" tanto simili all'erba vera da essere presi in considerazione dalla FIFA che, con il protocollo "FIFA Quality Concept" ha sancito ufficialmente la possibilità di utilizzare le superfici sintetiche anche per le competizioni ufficiali.
- Prodotti Industriali e Applicazioni: in questo settore vengono compresi: mattonelle per pavimentazioni, prodotti per assorbimento rumori, prodotti per il trattamento di suoli, materassi per l'allevamento bovino, pannelli antivibranti per macchinari industriali, manufatti per l'arredo urbano.

Polverino

Il polverino è il risultato del trattamento della gomma per ottenere particelle finemente disperse al di sotto di 1 mm (Foto 2.7). I principali utilizzi includono: soles di scarpe, impianti sportivi, rivestimenti per cavi elettrici, ricambi per automobili, coloranti, inchiostri, leganti per bitume poroso, rivestimenti e sigillanti, pavimentazioni. Questo segmento raggruppa: rigenerazione, materiale con superficie modificata o attivato, elastomeri termoplastici, materiali pirolitici ed altri materiali raggruppati nella categoria "altro".



Foto 2.7 - Polverino di pneumatico (< 1 mm)

Nella maggioranza dei casi il polverino rappresenta un ingrediente di un compound, con il quale viene miscelato e mescolato con materia vergine. Il polverino è stato successivamente utilizzato nella realizzazione di strade o come materiale di rivestimento aggiungendolo ad un solvente in modo da formare una sospensione in gomma. Tale prodotto viene utilizzato come impermeabilizzante. Il prodotto può essere utilizzato come vernice, spray o come bagno in cui immergere il manufatto affinché acquisisca proprietà impermeabilizzanti.

Rigenerato

La rigenerazione è uno dei processi capaci di ripristinare alcune delle caratteristiche della gomma vergine al materiale riciclato. Alcune di queste proprietà, che permettono al materiale riciclato di poter essere utilizzato come surrogato alla gomma vergine, sono: durezza, densità, buona viscosità, elevata resistenza alla trazione, buon allungamento a rottura e buona capacità di adesione. Durante la rigenerazione è possibile caratterizzare il materiale, alterando il contenuto dell'idrocarburo e del nero di carbonio nella gomma, la viscosità o la resistenza alla trazione. L'aggiunta del rigenerato nel compound permette ad esso di essere ri-vulcanizzato. Il mercato più ampio che assorbe questo prodotto è nella produzione di pneumatici nuovi. Quantità significative (oltre il 75% del rigenerato) vengono impiegate nella produzione di soles ed altri elementi di calzature.

Superfici modificate o materiale attivato

Presentano un'elevata struttura superficiale tale da favorire un'alta densità di legami trasversali permettendo un uso nei nuovi prodotti in gomma. Le caratteristiche fisiche che lo distinguono sono: elevata densità, elevata resistenza alle abrasioni, elevata resistenza alla trazione ed al taglio e buon allungamento a rottura. Viene prevalentemente utilizzato come ingrediente attivo nelle soles per scarpe e nella realizzazione di alcune parti di automobili.

Elastomeri Termoplastici TPE

Sono nuovi compound che combinano le qualità del granulato con il tipico comportamento del termoplastico. Le caratteristiche sono: resistenza alla trazione ed al taglio, allungamento a rottura, durezza, resistenza agli urti, elasticità, densità di massa e modulo dinamico. I più importanti tra

questi sono l'allungamento permanente sotto il 50% e con, approssimativamente, la stessa durezza shore dei tradizionali elastomeri termoplastici. Una volta processato il TPE viene aggiunto al compound al quale conferisce determinate caratteristiche. Il materiale viene utilizzato in diversi settori tra i quali: industria, commercio, ingegneria civile, costruzioni ed altri.

Devulcanizzato

Sono materiali che sono stati riattivati riducendo i legami trasversali per ripristinare alcune delle caratteristiche della gomma vergine, essi non sono totalmente devulcanizzati. I materiali provenienti dal riciclaggio dei pneumatici fuori uso possono essere parzialmente devulcanizzati attraverso diversi metodi, ciascuno dei quali influirà sulle caratteristiche del prodotto finale; ad esempio, agenti chimici di attivazione possono cambiare alcune delle proprietà chimico fisiche del materiale risultante. Queste materiali sono caratterizzati da: durezza, bassa densità, diminuzione della reattività superficiale, buone proprietà di resistenza alla fatica, miglior resistenza alla trazione ed allungamento permanente minore del 50%. Il devulcanizzato può essere rivulcanizzato attraverso i metodi tradizionali senza aggiungere ulteriori additivi. Le proprietà richieste al prodotto finale determinano la quota di materiale devulcanizzato nella formula della gomma vergine. Quando il materiale riattivato viene miscelato con grandi quantità di gomma vergine, per la produzione di una serie di prodotti, può essere efficacemente utilizzato per l'estrusione e lo stampaggio ad iniezione. I prodotti risultanti presentano caratteristiche della tradizionale gomma vulcanizzata. Il processo e il prodotto più importante in cui viene utilizzato questo materiale è nella produzione di pneumatici nuovi, sostituendo il materiale vergine in quantità superiori al 10%.

2.3.3 Recupero energetico

Anche il recupero energetico rappresenta, come il recupero di materia, un'importante e valida forma di valorizzazione del pneumatico. E' tuttavia da ritenere una forma di recupero di secondo ordine, in quanto occorre sempre privilegiare il recupero di materia; anch'esso è tuttavia strettamente legato alla minimizzazione dei rifiuti, degli impatti economici ed ambientali. Sia il riciclaggio di materiale che il recupero energetico offrono un'alternativa complementare per poter trarre i migliori benefici di sviluppo sostenibile dalle risorse naturali e dei loro rifiuti e permettendo una riduzione del consumo delle risorse naturali. Circa il 25% dei pneumatici fuori uso in UE, e circa il 45% negli USA, sono utilizzati come combustibile alternativo in alcuni processi di recupero energetico, evitando così un minor consumo di combustibile fossile non rinnovabile. Tra le maggiori applicazioni: nei forni per la produzione del cemento o negli inceneritori per la produzione di energia elettrica, vapore, ecc.

Il combustibile derivato da pneumatici TDF (Tyre Derived Fuel) abbraccia una serie di prodotti che vanno dal pneumatico intero al triturato e al chips. In Giappone e in USA, tra gli altri, il recupero energetico è il mezzo principale di valorizzazione del pneumatico fuori uso e dei rifiuti industriali. Recentemente, grazie allo sviluppo ed al perfezionamento dei metodi di controllo delle emissioni ed alla disponibilità di installare le migliori tecnologie disponibili per l'abbattimento degli inquinanti, si è ribadito che l'incenerimento rappresenta una risorsa di energia percorribile e con limiti di emissioni di IPA al di sotto della soglia limite dannosa alla salute umana.

La combustione in cemenzeria

Sempre maggiore è l'utilizzo del PFU (pneumatico intero, metà pneumatico, ciabattato, triturato e chips) quale valido combustibile alternativo nell'industria del cemento. I principali vantaggi che ne derivano sono sostanzialmente:

- un significativo risparmio di materia prima, elettricità e di combustibile fossile non rinnovabile;
- una riduzione di emissione di CO₂ generato dal processo di produzione industriale;
- una efficace soluzione al problema sollevato attraverso l'incenerimento dei rifiuti prodotti.

L'utilizzo del pneumatico nel processo di produzione del cemento è particolarmente vantaggioso per la generazione di calore, purchè:

- l'energia recuperata dalla combustione dei pneumatici avvenga a temperature inferiori rispetto
- alla combustione del carbone (combustibile tradizionalmente più utilizzato);
- tutte le parti costituenti il pneumatico vengano valorizzate;
- ci siano risparmi sulla materia prima che nel consumo di energia.

Fondamentalmente i forni possono operare attraverso due tipologie di processi: processo ad umido (wet) e processo a secco (dry). Alcuni dei più vecchi forni, spesso di piccola capacità impiantistica, utilizzano il processo "wet", e affinché possano utilizzare il pneumatico fuori uso come combustibile alternativo, dovrebbero conformare i propri impianti. Questi forni, sulla base della recente Direttiva sull'incenerimento dei rifiuti, saranno inibiti dall'operare con i pneumatici fuori uso. I forni nuovi utilizzano il processo "dry" e furono costruiti con l'obiettivo di poter accogliere quantità elevate di pneumatici o in generale combustibile miscelato con altre tipologie di rifiuto.

La termovalorizzazione

La termovalorizzazione dei pneumatici fuori uso è un trattamento che permette di:

- generare elettricità;
- generare vapore;
- minimizzare i rifiuti;
- recuperare materie prime quali fili di acciaio, ossido di zinco e solfato di sodio.

Per tali motivi nell'industria dei pneumatici trova un crescente consenso l'attività di smaltimento di questi rifiuti e degli scarti di produzione in appositi termovalorizzatori. Infatti i produttori ed i ricostruttori di pneumatici frequentemente ricorrono a questa operazione ottenendo un duplice vantaggio. Da una parte permette di avere a disposizione vapore necessario al processo di vulcanizzazione, e dall'altra consente di operare una pratica di smaltimento e quindi di minimizzare la quantità di rifiuto. I pneumatici vengono bruciati in forni rotativi ed i gas provenienti dalla combustione sono recuperati in un caldaia a recupero la quale produce vapore surriscaldato o acqua. Nella caldaia vengono iniettati calce e calcare per rimuovere ossidi di zolfo dal flusso di gas. I fumi, dopo aver ceduto il loro contenuto entalpico all'interno della caldaia, sono inviati ad un sistema di filtrazione generalmente costituito da due gruppi di filtri a maniche: nel primo viene eseguito un trattamento di depolverazione da cui si ricavano ceneri ricche in ZnO (circa il 65%), mentre nel secondo gruppo di filtri, tramite reazione con bicarbonato di sodio, si effettua la desolforazione, quindi sono espulsi attraverso il camino. A valle del processo viene aggiunto un turbo generatore per la produzione di energia elettrica ed un sistema di nastri che permette l'estrazione e, attraverso l'utilizzo di un vibrovaglio, la pulizia dei fili di acciaio derivanti dalle carcasse. Il forno permette alla materia volatile di bruciare velocemente assicurando che il tempo di permanenza per il pneumatico o la gomma sia sufficientemente lungo affinché il nerofumo sia totalmente bruciato mentre il metallo viene trattenuto (impedendo al pneumatico di passare nel forno senza essere distrutto).

La pirolisi

Il processo di pirolisi consiste in una degradazione termica in atmosfera inerte; i pneumatici subiscono un cracking termico a temperature intorno ai 500-600°C, scindendosi in una parte solida (char) ed una volatile, in parte condensabile; quest'ultima può subire raffreddamento e condensazione portando all'ottenimento di una frazione liquida e di una gassosa incondensabile.

Il processo fornisce quindi come prodotti:

- una frazione gassosa, costituita essenzialmente da idrogeno, metano, etilene, etano, ossidi di carbonio ed altri gas combustibili;
- una frazione liquida, costituita da catrame, acqua ed una varietà di sostanze organiche (oli);
- una frazione solida, costituita dal residuo carbonioso, oltre che da ceneri, inerti, metalli, ecc.

Le percentuali delle tre frazioni dipendono dalla temperatura, dalla pressione e dal tempo di residenza del rifiuto nel reattore, nonché dalle temperature a cui viene operata la successiva fase di condensazione. La proporzione relativa tra i vari prodotti dipende dal modo in cui si realizza il processo e dai parametri di reazione. Sebbene la pirolisi risulti un'alternativa valida per il raggiungimento di un prodotto riutilizzabile attraverso la conversione del rifiuto pneumatico, essa deve risolvere alcune problematiche tecnologiche affinché si possano trovare applicazioni al trattamento del pneumatico, non per ultimo la valorizzazione della frazione solida (char) generata da questo processo. Il char prodotto nel processo di pirolisi può aprire interessanti scenari per le future sperimentazioni tra le quali il recupero di quantità di zinco. Tale prodotto, dopo trattamento termico a 550 °C può essere utilizzato come materiale di partenza per test sperimentali. Il carbonio proveniente dal processo di pirolisi, infatti, presenta delle caratteristiche simili all'analogo naturale previo trattamento dalla durata di due ore con un flusso di acido cloridrico concentrato.

3. VALORIZZAZIONE DEL PFU PER APPLICAZIONI NEL CAMPO DELL'ISOLAMENTO ACUSTICO

In questa parte della ricerca è stato studiato come valorizzare il PFU ai fini della produzione di materiali innovativi per l'isolamento acustico in edilizia. In particolare l'obiettivo è stato quello di produrre materiali innovativi ed alternativi, a quelli già presenti sul mercato di tipo tradizionale, per la riduzione del rumore negli edifici. Nel presente capitolo vengono illustrate innanzitutto alcune delle principali proprietà fisiche inerenti l'isolamento acustico e i requisiti che devono soddisfare gli edifici per rispettare i limiti imposti dalla vigente normativa. Successivamente vengono presentate le mescole sperimentali studiate e i risultati ottenuti nelle relative prove di laboratorio sia meccaniche che acustiche.

3.1. Elementi di acustica in edilizia

3.1.1. Il suono e la sorgente sonora

Il suono è caratterizzato dalla propagazione di onde di pressione in un mezzo elastico dovute alla rapida successione di compressioni ed espansioni del mezzo stesso. Affinché il fenomeno nasca e si propaghi è necessaria la presenza di una sorgente sonora e di un mezzo elastico che ne consenta la propagazione e proprio per quest'ultimo motivo il suono non può diffondersi nel vuoto. La sorgente sonora è costituita da un elemento vibrante che trasmette il suo movimento alle particelle del mezzo circostante, le quali oscillano attorno alla loro posizione di equilibrio.

Uno dei parametri che caratterizza il suono è la frequenza f , cioè il numero di oscillazioni effettuate in un secondo. Si parla di fenomeno sonoro quando la frequenza è compresa nell'intervallo: $20 \text{ Hz} \leq f \leq 20 \text{ KHz}$, ovvero l'intervallo in cui si assume convenzionalmente che l'orecchio umano sia sensibile. I segnali aventi frequenze inferiori e superiori sono detti rispettivamente infrasuoni ed ultrasuoni. Generalmente un suono non corrisponde ad un tono puro, caratterizzato da una sola frequenza di emissione, ma ad un segnale complesso costituito da un gran numero di frequenze che danno origine ad uno spettro continuo.

Il fenomeno sonoro, oltre alla frequenza, può essere descritto da altri parametri, quali il periodo T e la lunghezza d'onda λ , cioè il tempo e lo spazio richiesto per un'oscillazione completa. Le relazioni che intercorrono tra i suddetti parametri sono:

$$f = \frac{1}{T} \quad T = \frac{2\pi}{\omega} \quad \lambda = \frac{c}{f} \quad \omega = 2\pi f \quad c \cong 331.6 + 0.6t$$

3.1.2. Livelli sonori e scale di misurazione

Le grandezze acustiche caratteristiche hanno un ampio campo di variabilità e per tale motivo è nata l'esigenza di fare uso di una scala logaritmica nella quale, al valore della grandezza in esame, si fa corrispondere il logaritmo del rapporto tra quello stesso valore ed un prefissato valore di riferimento. Più comunemente, però, la grandezza acustica viene espressa in decibel (dB) ossia dieci volte il logaritmo in base dieci del suddetto rapporto.

In generale, dunque, data una grandezza G il corrispondente livello L_G , vale:

$$L_g = 10 \log \frac{G}{G_{rif}}$$

Si osserva che i rapporti G/G_{rif} sono adimensionali e proporzionali all'energia del segnale sonoro, mentre le grandezze in questione possono essere: Pressione acustica (p), Impedenza acustica (Z), Intensità acustica (I), Densità di energia sonora (D), Potenza sonora (W). I valori di riferimento da prendere sono riportati nella normativa UNI EN 21683.

Il Suono può essere formato da un tono puro, da più toni puri, da suoni complessi oppure da rumori con frequenze a diversi livelli. Per prescrivere criteri di tollerabilità al rumore, bisogna studiarne la forma dello spettro sonoro, la durata e il rumore di fondo. L'analisi della composizione in frequenza dei suoni può essere effettuata con diversi metodi basati sulla suddivisione del contenuto di energia sonora in bande, cioè in prefissati intervalli di frequenza. Ciascuna banda è caratterizzata dalla frequenza nominale di centro banda f_c e dalle frequenze di taglio superiore f_s e inferiore f_i . Si è creato in seguito un metodo di attribuzione di indice al rumore: si sovrappone lo spettro sonoro ad una serie di curve di riferimento (assomiglianti alle curve isofoniche) e si attribuisce al rumore l'indice di valutazione della prima curva sotto la quale rimane l'intero spettro.

3.1.3. Assorbimento, Riflessione e Trasmissione del suono

Quando il fronte di un'onda sonora urta contro una parete, come mostrato in Fig. 3.1 generalmente si assiste al verificarsi di tre fenomeni che contribuiscono in maniera diversa alla ridistribuzione dell'energia trasportata dall'onda stessa: una parte di questa energia viene riflessa secondo le leggi della meccanica classica; una parte viene dissipata all'interno del materiale di cui è costituita la parete, ed una terza parte attraversa il materiale e procede liberamente oltre.

Se si definisce W_i l'energia totale che nell'unità di tempo (potenza) incide sulla parete e W_a , W_r , W_t le quote di potenza rispettivamente assorbita dalla parete, riflessa e trasmessa, si ha la seguente equazione di bilancio:

$$W_i = W_a + W_r + W_t$$

Ora, dividendo entrambi i membri dell'equazione per la potenza totale W_i incidente sulla parete, si può riscrivere l'equazione come:

$$1 = a + r + t$$

dove “ a ” (coeff. di assorbimento), “ r ” (coeff. di riflessione) e “ t ” (coeff. di trasmissione) sono dei coefficienti adimensionali che esprimono rispettivamente le quote di potenza sonora assorbita, riflessa e trasmessa.

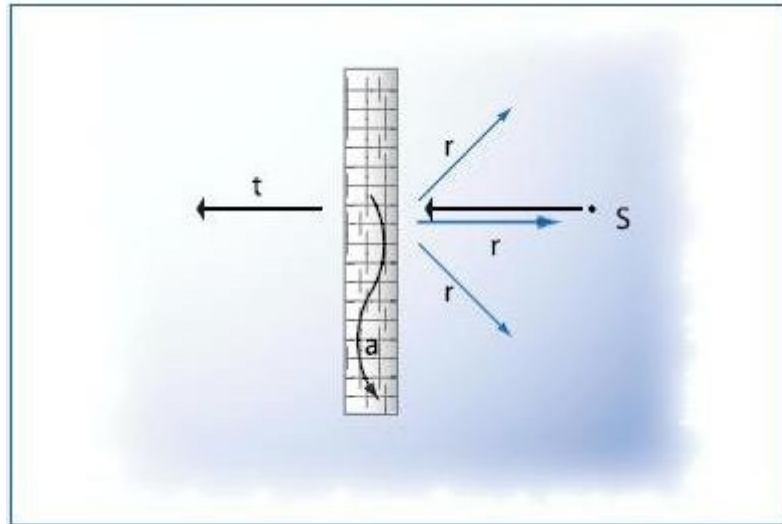


Fig. 3.1 – Onda incidente che si ripartisce in assorbita, riflessa e trasmessa

Dai coefficienti r e t sono state definite le grandezze fisiche che caratterizzano le prestazioni acustiche di una struttura:

- **il coefficiente di assorbimento acustico apparente (α)** che indica la capacità di una struttura di non riflettere energia verso la sorgente sonora;

$$\alpha = 1 - r = a + t = 1 - \frac{W_r}{W_i}$$

- **il potere fonoisolante R** , che quantifica la capacità di un componente di ridurre la trasmissione del suono incidente su di esso. R varia al variare della frequenza e delle proprietà fisiche, delle dimensioni e delle condizioni di vincolo del componente. Il valore di R può essere ottenuto da prove di laboratorio effettuate con procedure normalizzate o calcolato utilizzando mezzi empirici o semiempirici che si basano sulla teoria della vibrazione dei corpi o su algoritmi derivati da elaborazioni statistiche di dati sperimentali reperibili in letteratura. La formula per la sua determinazione è:

$$R = 10 \log\left(\frac{1}{\tau}\right) = 10 \log\left(\frac{W_i}{W_t}\right)$$

Dal punto di vista fisico le due grandezze hanno significato diverso: α rappresenta le caratteristiche fonoassorbenti di un materiale mentre R quelle fono-isolanti. Particolare importanza riveste poi la relazione che sussiste tra angolo di incidenza e coefficiente di assorbimento (Grafico 3.1).

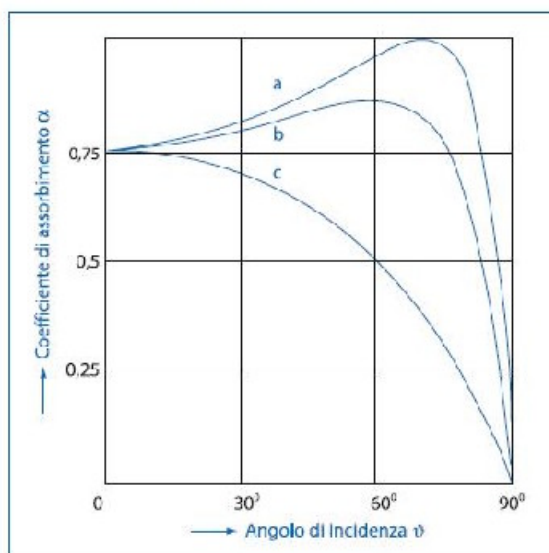


Grafico 3.1 – Relazione tra angolo di incidenza e coefficiente di assorbimento

I materiali che forniscono le migliori prestazioni fonoassorbenti presentano bassa massa, alta porosità, superficie cedevole; viceversa i materiali che danno le migliori garanzie di fono-isolamento hanno massa elevata, superficie continua, sono rigidi e non porosi. Solo accoppiando opportunamente materiali dei due tipi è possibile contemporaneamente ottenere un buon grado di isolamento e di assorbimento acustico.

3.1.4. Il suono in ambiente esterno ed interno: modalità di propagazione

Le sorgenti di rumore possono essere esterne o interne all'edificio stesso. Le principali fonti di rumore nell'ambiente esterno sono costituite dal traffico, da attività produttive, da centrali termiche ed elettriche, da attività commerciali e ricreative di ogni genere. All'interno delle unità abitative invece il rumore può essere generato dagli impianti e dalle attività delle persone.

La propagazione in ambiente esterno avviene in campo libero, cioè senza incontrare nessun ostacolo che possa causare fenomeni di assorbimento, diffrazione o riflessione. Le onde sonore si allontanano dalla sorgente subendo il solo fenomeno della divergenza; le sorgenti si possono schematizzare in tre tipologie:

- Sorgente puntiforme (la propagazione avviene per onde sferiche di eguale intensità in tutte le sue direzioni);
- Sorgente lineare (produce onde cilindriche parallele equidistanti dalla sorgente);
- Sorgente piana (con onde acustiche piane).

Possiamo anche definire una quarta tipologia di sorgente detta “vincolata” cioè vincolata ad irradiare una quantità maggiore di energia solo in una certa direzione introducendo il fattore di direttività (Q). Esistono anche dei fattori di attenuazione chiamati così perché si oppongono alla propagazione delle onde, sono fenomeni dissipativi dovuti all’assorbimento dell’aria, all’effetto del suolo, alla vegetazione ed alla temperatura.

Per quanto riguarda l’ambiente chiuso, non valgono più i principi del campo libero. Questo perché quando un’onda sonora incontra una parete, l’energia trasportata si distribuisce nelle tre componenti già analizzate precedentemente: riflessione, assorbimento e trasmissione.

Nel momento in cui la sorgente smette di erogare l’onda sonora avviene il fenomeno chiamato “coda sonora” nel quale permane per un breve periodo un riflesso che tende ad esaurirsi col passare del tempo. Questo tempo è chiamato “tempo di riverberazione”, cioè l’intervallo di tempo che trascorre dal momento in cui la densità di energia si riduce ad un valore pari ad un milionesimo della densità a regime.

3.1.5. Proprietà dei materiali fonoassorbenti

Per quanto riguarda le sorgenti di rumore interne causate dalle attività delle persone, queste possono essere dovute ad innumerevoli situazioni, anche imprevedibili, contro le quali non sempre la legislazione vigente può creare limitazioni. Ascoltare musica o la televisione, parlare, camminare, spostare sedie o altri oggetti, aprire le tapparelle, persino dormire, sono alcune delle innumerevoli situazioni che possono determinare rumori disturbanti. L’unica soluzione è avere degli edifici accuratamente realizzati in grado essi stessi, per le loro proprietà acustiche, di rendere minimo il disturbo di questo tipo di sorgenti.

Per far ciò si necessita di materiali fonoassorbenti in grado di controllare le riflessioni indesiderate, la riverberazione ed in particolare il rumore. Vengono inoltre utilizzati all’interno delle strutture divisorie come pareti, solai o tramezzi per fornire smorzamento ed evitare risonanze. A seconda del loro principio di funzionamento si possono suddividere in tre categorie:

- materiali porosi (sfruttano la dissipazione viscosa)
- risuonatori acustici o di Helmholtz (sfruttano la risonanza delle cavità)
- pannelli o membrane vibranti (sfruttano la risonanza del pannello).

Come si può osservare dal Grafico 3.2 ciascuno di questi meccanismi di assorbimento acustico è maggiormente efficiente in un determinato campo di frequenza. Soltanto la giusta combinazione tra i tre meccanismi di assorbimento porta risultati soddisfacenti, con l'individuazione di un sistema misto in grado di assorbire un ampio campo di frequenze.

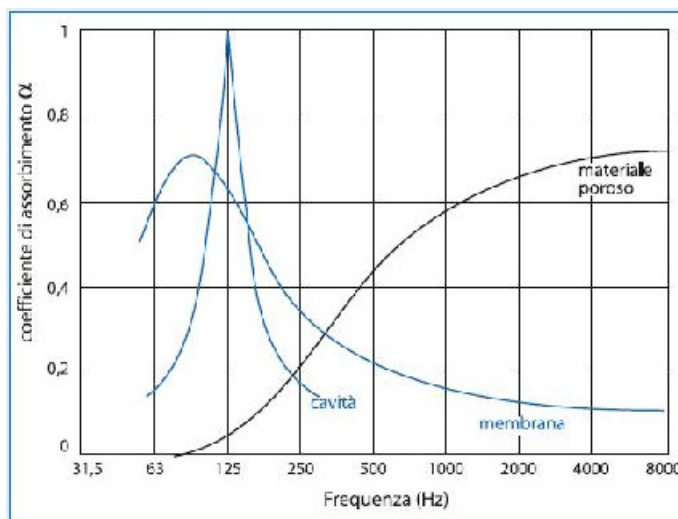


Grafico 3.2 – Diversi meccanismi di assorbimento acustico in funzione delle frequenze

Soltanto la giusta combinazione tra i tre meccanismi di assorbimento porta risultati soddisfacenti, con l'individuazione di un sistema misto in grado di assorbire un ampio campo di frequenze.

3.2. Comportamento dei materiali rispetto all'isolamento acustico

L'isolamento acustico è direttamente legato alla trasmissione del suono tra due ambienti differenti, in uno dei quali è presente la sorgente sonora e nell'altro il ricevitore. Il suono, emesso dalla sorgente, si propaga nell'aria sino ad incontrare l'elemento di separazione tra i due ambienti, che entrando in vibrazione invia energia sonora verso il ricevitore. In questa schematizzazione della trasmissione del suono per via aerea la struttura di separazione si comporta come elemento passivo e condiziona, attraverso le sue caratteristiche, la trasmissione stessa. La verifica dell'isolamento acustico secondo la normativa DPCM 5-12-97 e s.m.i. deve essere fatto sia in laboratorio che in opera, questo perché le prestazioni acustiche sono influenzate sia dai divisori che dalle condizioni al contorno e dalle modalità di posa in opera.

In particolare nel campo dell'isolamento acustico in edilizia vale la legge di massa:

$$t = \frac{1,75 \cdot 10^4}{M^2 \cdot f^2}$$

la quale esprime che il *coefficiente di trasmissione di potenza sonora* aumenta al diminuire della massa della parete per unità di area e della frequenza del suono; questa espressione è valida per

pareti omogenee, le quali separino ambienti pieni d'aria, per frequenze non troppo superiori ai 3000 Hz e per onde con incidenza normale. Si introduce poi il concetto di potere fonoisolante:

$$R = 10 \log \left(\frac{1}{t} \right) = 10 \log \left(\frac{W_i}{W_r} \right)$$

ovvero $R = 20 \log (Mf) - 42,4$

A questo punto è doveroso sottolineare che le formule appena citate hanno valore approssimativo, ovvero applicabile ad una parete “ideale” in quanto il fenomeno dell'isolamento acustico di una parete reale è decisamente più complesso. Ad esempio, la relazione tra potere fonoisolante e frequenza è complesso, così come mostra il Grafico 3.3 .

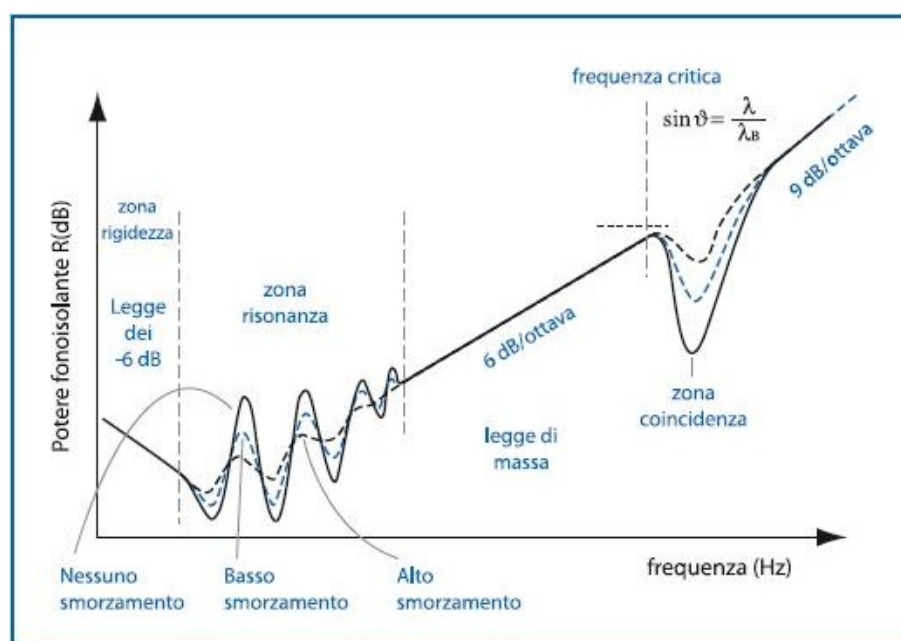


Grafico 3.3 – Relazione tra potere fonoisolante in funzione delle frequenze e dello smorzamento

In un primo intervallo di basse frequenze delle onde sonore incidenti, il potere fonoisolante di un pannello tendenzialmente cresce, ma con ampie oscillazioni dovute alla risonanza del pannello stesso (fenomeno avvertibile dall'orecchio umano solo con pannelli molto rigidi e fini, per esempio metallici). In un secondo intervallo di medie frequenze si ha una crescita in accordo con la legge di massa. In un ultimo intervallo di elevate frequenze si ha, all'inizio, un'ulteriore crescita, seguita subito da un brusco calo, detto effetto di coincidenza: le componenti tangenziali delle onde sonore incidenti arrivano a coincidere con le frequenze di risonanza flessionali del pannello, così che sulla faccia di uscita dello stesso si hanno non solo le onde sonore che sono riuscite a passare, ma anche quelle provocate dalle vibrazioni in risonanza del pannello stesso.

Questo ragionamento permette di calcolare (ma solo in prima approssimazione, in mancanza di dati sperimentali più affidabili) il potere fonoisolante di un certo materiale:

- si calcola R con la formula sperimentale, fermandosi a una frequenza tale per cui il valore di R ne raggiunge uno ben definito per ogni tipo di materiale;
- si mantiene R costante a tale valore per un intervallo di frequenze (medie) dipendente dal materiale;
- si aumenta R di 6 dB per ogni ottava in un terzo intervallo di alte frequenze.

3.2.1. Proprietà dei materiali fonoisolanti correlate con le prestazioni acustiche

Le principali proprietà fisico-acustiche dei materiali fonoisolanti sono:

- resistenza al flusso d'aria;
- Rigidità dinamica;
- Porosità

La resistenza al flusso d'aria di materiali porosi è una proprietà che permette di valutare indirettamente alcune proprietà acustiche come l'assorbimento e l'attenuazione.

La resistenza al flusso si definisce nel seguente modo:

$$R = \frac{\Delta p}{Q_v} [MPa \cdot s/m^3]$$

dove Δp è il gradiente di pressione [Pa] misurato prima e dopo il passaggio di un flusso di aria Q_v (m³/s) attraverso il provino.

La resistenza al flusso specifica si ottiene moltiplicando la resistenza al flusso per la superficie del campione:

$$R_s = R \cdot A = \frac{\Delta p}{v} [Pa \cdot s/m]$$

La resistività al flusso si ottiene dividendo la resistenza al flusso specifica per lo spessore del campione:

$$r = \frac{R_s}{d} = \frac{\Delta p}{v \cdot d} [Pa \cdot s/m^2]$$

La resistività è una proprietà intrinseca del materiale e non dipende dalle sue dimensioni e dal suo spessore. La misura della resistenza al flusso può essere effettuata mediante un flusso continuo o un flusso alternato di aria. Entrambe le tecniche sono descritte nella normativa UNI EN 29053.

La rigidità dinamica di un materiale resiliente è il rapporto tra la forza dinamica e lo spostamento dinamico. Nel caso dei pavimenti galleggianti si usa la rigidità dinamica per unità di superficie che è espressa in N/m³.

$$s' = \frac{F/A}{\Delta L}$$

con “F” forza dinamica applicata sul campione, “A” area del campione e “ΔL” variazione di lunghezza dovuta alla forza applicata.

La rigidità dinamica non è una proprietà intrinseca del materiale essendo correlata sia con il modulo di elasticità “E” (o modulo di Young che è una proprietà intrinseca del materiale) che con lo spessore iniziale del campione secondo la seguente formula:

$$s' = \frac{E}{L_0}$$

essendo “E” definito come il rapporto tra la tensione normale e la deformazione:

$$E = \frac{F \cdot L_0}{A \cdot \Delta L}$$

La misura della rigidità dinamica di materiali utilizzati per i pavimenti galleggianti si effettua secondo la normativa UNI EN 29052.

Un carico appoggiato per lungo tempo sul materiale può cambiare le sue proprietà fisiche, quindi la rigidità dinamica del materiale cambia e di conseguenza anche la sua capacità di ridurre il rumore di calpestio. La rigidità dinamica cambia poiché la variazione permanente di spessore del materiale dovuta al carico statico fa variare la frequenza di risonanza secondo la seguente equazione:

$$f_{ris} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta_{st}}}$$

dove “g” è l’accelerazione di gravità e “δ_{st}” è la variazione permanente di spessore dovuta al carico statico.

L’influenza del carico statico viene valutata attraverso la misura della comprimibilità del materiale resiliente.

La comprimibilità è un valore che esprime il sovraccarico sul pavimento a cui il materiale isolante è in grado di resistere mantenendo inalterato, nel tempo, il valore di rigidità dinamica. La misura della comprimibilità viene effettuata secondo la normativa UNI EN 12431.

La porosità è definita come il rapporto tra il volume del fluido contenuto nei pori ed il volume totale occupato dal campione, possiamo quindi scrivere:

$$\Phi = \frac{V_v}{V_t}$$

Da essa naturalmente dipendono: la capacità di coibentazione, la resistenza meccanica, la durabilità dei materiali. La sua valutazione è necessaria, in chimica per controllare il grado di avanzamento dei processi di sinterizzazione. Bisogna comunque sottolineare che nella determinazione della porosità i pori chiusi non dovrebbero essere conteggiati nel volume totale dell'aria, questo perché non sono coinvolti nella propagazione delle onde sonore all'interno del materiale.

Queste tre caratteristiche fondamentali, sopramenzionate, saranno oggetto di studio per determinare il potere fonoisolante ed il livello di calpestio delle mescole studiate nella presente ricerca.

3.2.2. Tecniche costruttive per la riduzione del rumore di calpestio

I rumori impattivi più frequenti sono dovuti al calpestio e dalla caduta di oggetti; le ricerche negli ultimi anni si sono concentrate su studi per ridurre al minimo queste tipologie di rumore. Una tecnica particolare è costituita dai **pavimenti galleggianti**, la cui efficienza è correlata con le proprietà meccaniche dei materiali resilienti utilizzati (sughero, gomme...), in particolare con la loro rigidità dinamica. Lo strato elastico, perché sia efficace, deve essere posto in opera in modo accurato. Il piano di posa deve essere livellato e privo di rugosità che potrebbero danneggiare il materiale e creare dei ponti acustici. La soletta deve essere separata dalle pareti laterali e dai pilastri mediante l'interposizione di una striscia elastica perimetrale. Bisogna poi proteggere il materiale isolante mediante una pellicola di polietilene o di altro materiale.

Gli eventuali impianti tecnologici devono essere rivestiti con guaine elastiche che impediscano il contatto diretto con la struttura galleggiante, con il solaio, e con le pareti degli ambienti così da non trasmettere vibrazioni agli elementi strutturali. Naturalmente questa tipologia costruttiva è realizzabile per le nuove costruzioni, e se il pavimento galleggiante viene montato a regola d'arte la riduzione del rumore di calpestio ΔLW può arrivare anche a 30 dB (si noti che si tratta di una riduzione molto notevole essendo la scala in dB una scala logaritmica)..

Un'altra metodologia di attenuazione del rumore di calpestio, molto utile per le vecchie costruzioni, è il **controsoffitto**. Un'opera edile costituita da una superficie piana dalla struttura leggera, posta al di sotto del soffitto, che determina una diminuzione dell'altezza utile del locale interessato. Il controsoffitto può realizzarsi per rispondere ad esigenze estetiche, per eseguire un rivestimento con materiale termoisolante, fonoassorbente e/o fonoisolante o resistente al fuoco, ed è utilizzato anche per ospitare, nel vano che si viene a creare tra lo stesso e il soffitto, uno o più impianti.

I vantaggi sono dati dalla possibilità di permettere il passaggio di impianti e collegamenti orizzontali di qualsiasi tipo, con un'ottima resa estetica, garantendo una flessibilità e un'ispezionabilità che generalmente ripagano dei costi di realizzazione, specie se i locali hanno un uso commerciale o ad uffici, nei quali le suddette caratteristiche risultano di importanza fondamentale. La tecnica di realizzazione prevede spesso l'utilizzo di una struttura metallica leggera che forma un reticolato sul quale vengono fissati o talvolta semplicemente appoggiati, i pannelli di materiale anch'esso molto leggero (fibre minerali, lana di roccia, lana di vetro, sughero, ecc.) e maneggevole, specie se pensato per rispondere a requisiti di fono-assorbimento per la quale è fondamentale il requisito di porosità. Il controsoffitto si presta ad essere utilizzato in interventi di recupero e di restauro proprio per la semplicità di montaggio, leggerezza e modellabilità dei componenti utilizzati.

3.2.3. Normativa ed accenni sui pavimenti galleggianti

Il requisito acustico che caratterizza il comportamento dei pavimenti e dei solai nei confronti dei rumori impattivi è il livello di rumore di calpestio. La prestazione viene valutata attraverso la misura del livello di pressione sonora nell'ambiente sottostante, quando sul pavimento agisce una macchina normalizzata generatrice di rumori impattivi.

La misura in laboratorio del rumore di calpestio è descritta nella norma UNI EN ISO 140-6 mentre per la misura in opera si fa riferimento alla norma UNI EN ISO 140-7.

La norma UNI EN ISO 140-8 descrive invece la misura in laboratorio della riduzione del rumore di calpestio trasmesso da rivestimenti di pavimentazioni su un solaio pesante normalizzato mentre le misure in opera vengono eseguite in edifici finiti e riguardano l'intero solaio.

Il pavimento galleggiante, come si vedrà meglio in seguito, rappresenta una soluzione fortemente consigliata per la riduzione dei rumori impattivi dei solai grazie alla possibilità di intervenire sulle modalità di riduzione delle trasmissioni strutturali senza modificare la concezione statica della struttura edilizia. Il sistema costruttivo prevede infatti l'interposizione, tra il solaio grezzo strutturale la pavimentazione superficiale, di uno strato di materiale resiliente e di un massetto, avente lo scopo di ridurre la trasmissione dell'energia vibrazionale proveniente dall'impatto di oggetti sul pavimento, tipicamente il calpestio durante il passaggio delle persone. Da un punto di vista puramente teorico tale struttura può essere assimilata ad un sistema massa-molla fissata ad una struttura sottostante rigida, come riportato nella Fig. 3.2.

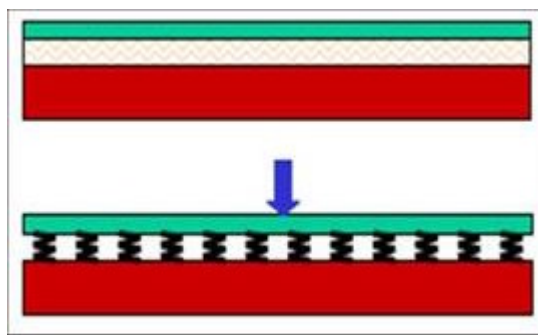


Fig. 3.2 - Pavimento galleggiante che si comporta come un letto di molle

Nella ipotesi che il solaio portante di base sia infinitamente rigido, la struttura superiore presenta una frequenza di risonanza approssimabile alla seguente relazione:

$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{s'}{m'}}$$

dove:

s' = rigidità dinamica superficiale dello strato elastico (MN/m³) "1600msf

m' = massa superficiale del massetto del solaio (sopra lo strato elastico) (kg/m²)

Il sistema accoppiato massa – molla consente di ridurre la trasmissione della forza impattante per frequenze superiori alla frequenza f_0 , attenuazione che aumenta al crescere della frequenza della forza di eccitazione. E' quindi evidente come maggiori effetti di isolamento ai rumori impattivi si riescano ad ottenere realizzando un sistema (materiale resiliente + massetto-pavimento) avente la propria frequenza di risonanza più bassa possibile. In ambito civile in cui usualmente il massetto in cls presenta spessori di 5-6 cm, ciò è ottenibile utilizzando materiali resilienti di determinato spessore che presentino un valore di rigidità dinamica possibilmente inferiore a 50 MN/m³.

3.2.4. La corretta progettazione ed esecuzione del pavimento galleggiante

La costruzione di un pavimento galleggiante deve seguire alcuni accorgimenti realizzativi finalizzati ad una corretta posa in opera sia del materiale resiliente che del massetto – pavimento superiore. Occorre innanzitutto garantire che il materiale resiliente possa mantenere nel tempo le proprie caratteristiche di rigidità dinamica ed evitare in secondo luogo che possano nascere dei punti di contatto rigidi tra la pavimentazione e le strutture perimetrali.

Per quanto concerne il primo aspetto è buona regola livellare il solaio di base su cui appoggerà il successivo materiale resiliente; nel caso in cui siano predisposti reti impiantistiche, queste dovranno essere ricoperte (con massetto alleggerito o polistirolo) in modo da realizzare sempre una superficie piana di appoggio. Successivamente verrà steso il materiale resiliente (in pannelli o

rotoli) evitando di eliminare qualsiasi discontinuità tra i vari elementi, discontinuità che potrebbero creare dei punti deboli o di contatto tra il massetto superiore ed il solaio sottostante.

Prima di stendere il materiale è necessario posizionare sui bordi perimetrali una fascia che consenta di svincolare strutturalmente il massetto e pavimento superiore dalle pareti laterali.

Verrà quindi realizzato il massetto superiore e la pavimentazione superficiale che andranno ad appoggiarsi, in corrispondenza delle pareti, alla fascia perimetrale. Lo spessore del massetto dovrà essere, nelle tolleranze di cantiere, quello di progetto, in modo da non modificare sostanzialmente le caratteristiche di rigidità dinamica del sistema. L'ultima operazione dovrà essere quella di rifilare la fascia perimetrale. Un eventuale battiscopa non dovrà essere a contatto con il pavimento se non tramite giunto elastico.

Per quanto concerne l'interazione con componenti impiantistici inseriti nella struttura, come ad esempio le tubazioni idrauliche, occorre prestare molta attenzione ad evitare che tali elementi possano rappresentare delle vie di propagazione del rumore e vibrazioni preferenziali, pregiudicando l'efficienza del sistema. Come indicazione generale è consigliabile posizionare le condutture impiantistiche nella struttura del solaio di base in modo da svincolare completamente il massetto superiore (Fig. 3.3).

Una volta posizionate le tubazioni occorre livellare la superficie superiore (getto di livellamento) in modo da realizzare una superficie piana di appoggio per il materiale resiliente.

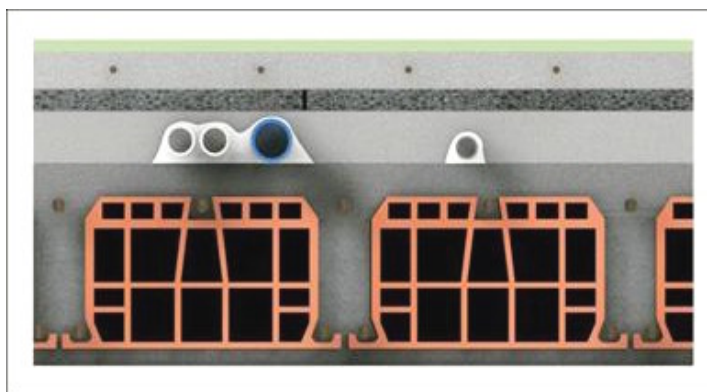


Fig. 3.3 - Posizionamento delle tubazioni impiantistiche al di sotto del sistema galleggiante

Nella progettazione di un pavimento galleggiante è dunque fondamentale la scelta del sistema del materiale resiliente da accoppiare al massetto superiore. Il materiale deve garantire nel tempo le proprie caratteristiche meccaniche anche se sottoposto a carico: prova di comprimibilità effettuata secondo la norma UNI EN 12431. Non vanno tuttavia trascurati tutti quegli aspetti legati alle possibili connessioni strutturali che rientrano sotto il termine di “trasmissioni laterali” che possono pregiudicare in modo significativo la prestazione acustica del sistema.

Nella scelta dei materiali utilizzati come rivestimenti di pavimentazione o come sistemi resilienti per pavimenti galleggianti è molto importante saper distinguere quale dato prestazionale viene

fornito dal produttore per caratterizzare la capacità del sistema di attenuare i rumori impattivi di calpestio.

Si possono avere i seguenti parametri:

- *rigidità dinamica superficiale*, parametro fisico caratteristico del materiale, determinabile secondo la norma UNI EN 29052-1;
- *attenuazione del livello di pressione sonora da calpestio L* è il dato che fornisce direttamente il valore di attenuazione del livello di rumore di calpestio fornito da un pavimento galleggiante o da un rivestimento di solaio, che venga realizzato al di sopra di un solaio di base;
- *livello di pressione sonora da calpestio normalizzato* L_n di un solaio finito, è il dato corrispondente alla prestazione globale del solaio nelle condizioni di misura.

3.3. Prove sperimentali meccaniche e acustiche su mescola contenente granuli di PFU

La mescola sperimentale studiata è stata prodotta utilizzando granuli di PFU (forniti dalla ditta AMBRA AMBIENTE di Cotignola di Ravenna) e un copolimero stirene acrilico in dispersione acquosa. Trattandosi quindi di un materiale applicabile con tecnica a “getto” può essere facilmente spalmato o spruzzato (con idonee pistole) su una base di appoggio sia orizzontale che verticale (grazie alle ottime doti di adesione).

Tale materiale si solidifica entro le 48 ore (in relazione alla temperatura e umidità dell’ambiente stesso) e diventa così un corpo unico con il materiale inerte su cui aderisce perfettamente.

Al fine di effettuare prove di laboratorio sono stati realizzati idonei provini deposti su un laterizio di misura 20*20 cm.

Come mostra la Foto 3.1 il materiale appare come un’amalgama di grani grossolani di pneumatico con superficie irregolare, piuttosto scabra e di colore nero con delle inclusioni di altri materiali, tenuti assieme da un collante per rendere il materiale “un corpo unico” e farlo aderire alla superficie di impiego.

Sono state prodotte due tipologie di provini, differenziati per il tipo di prove di laboratorio che si sono volute effettuare: meccaniche ed acustiche.



Foto 3.1 – Posa di materiale e provino realizzato con granuli di PFU

Inoltre al fine di replicare le prove sono stati realizzati i seguenti lotti:

- primo lotto di provini usati nelle prove preliminari acustiche consisteva in 3 provini 20*20 cm di spessore pari a 1-1,5-2 cm e 16 provini 5*5 cm spessi 2,5 cm usati in quelle meccaniche.
- secondo lotto di provini usati prevalentemente nelle prove acustiche era composto da 6 provini 20*20 cm spessi 1 cm e 3 provini tondi di diametro 10 cm e spessi 1 cm.

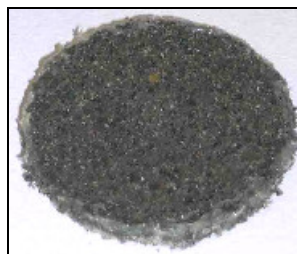


Foto 3.2 – Provini quadrati e circolari per prove meccaniche ed acustiche

3.3.1. Prove meccaniche e modello numerico

Le prove meccaniche sono state effettuate presso i laboratori del Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Ferrara e, in particolare, la macchina utilizzata per i test di carico è una INSTRON 4467 (Foto 3.3). Essa è composta sostanzialmente da una parte inferiore fissa, dove viene posto un piatto di carico sopra il quale è stato posizionato il provino da testare e una parte superiore composta da una traversa mobile mossa da un motore elettrico tramite due viti senza fine.

Al centro della traversa trova posto una cella che può essere sostituita a seconda dell'entità della forza che si vuole imprimere al provino e ha una duplice funzione:

- comprimere o eventualmente estendere il materiale da caratterizzare
- calcolare con quanta forza e di quanto viene compresso/esteso il materiale in esame.

Come primo passo per verificare le caratteristiche meccaniche è stata eseguita una prova di compressione del materiale, quindi ri-misurati i provini di 5*5 cm col calibro sono stati messi sul piatto di carico della macchina.



Foto 3.3 – Pressa modello INSTRON 4467

Sulla traversa della pressa è stata montata inizialmente la cella di carico minore cioè da 500 N (la quale è più sensibile alle piccole variazioni di carico) si sono impostati i valori di precarico a 1,2 N sul provino (perché la superficie era discontinua essendo il primo campione di prova), si è azzerata la posizione di partenza per il calcolo della deformazione, si è impostata la velocità pari a 2 mm/min della traversa e i parametri di sicurezza sia sul carico massimo applicabile, sia sulla compressione minima attuabile, quindi è stato avviato il tutto (a temperatura ambiente) servendoci di un'interfaccia e gestendo il macchinario tramite un computer dove veniva utilizzato un programma sviluppato in ambiente LabView .

Posto il primo provino di 5*5 cm sulla piattaforma di carico solidale alla parte fissa della macchina e avviata la pressa si sono raggiunti subito i limiti di carico impostati quindi è stata sostituita la cella di carico con una meno precisa nel rilevare le piccole variazioni ma capace di sopportare maggiori sforzi ovvero quella da 30 kN.

Riutilizzando lo stesso provino che non sembrava aver sofferto della precedente prova si sono reimpostati i valori di sicurezza relativi al carico massimo lasciando invariati quelli relativi alla deformazione e la velocità della traversa e come risultato è stato rilevato un carico di 10 kN; dopo un successivo test su un altro provino irregolare con risultati più o meno simili si è passati ai provini “buoni” ovvero con uno spessore costante in tutta la sua superficie ed è stato visto che i valori massimi ottenuti erano quasi doppi e oscillavano in un range compreso tra i 17 e i 22 kN,

questo è da imputare sostanzialmente ad una maggiore regolarità dello spessore della superficie e quindi ad una maggiore “impronta” da parte delle pressa sul provino.

La Foto 3.4 mostra come risultano deformati i provini dopo la suddetta prova di compressione.



Foto 3.4 – Deformazione provini dopo prova meccanica di compressione

Il Grafico 3.4 mostra quindi i risultati ottenuti e la relazione tensione-deformazione sui provini testati.

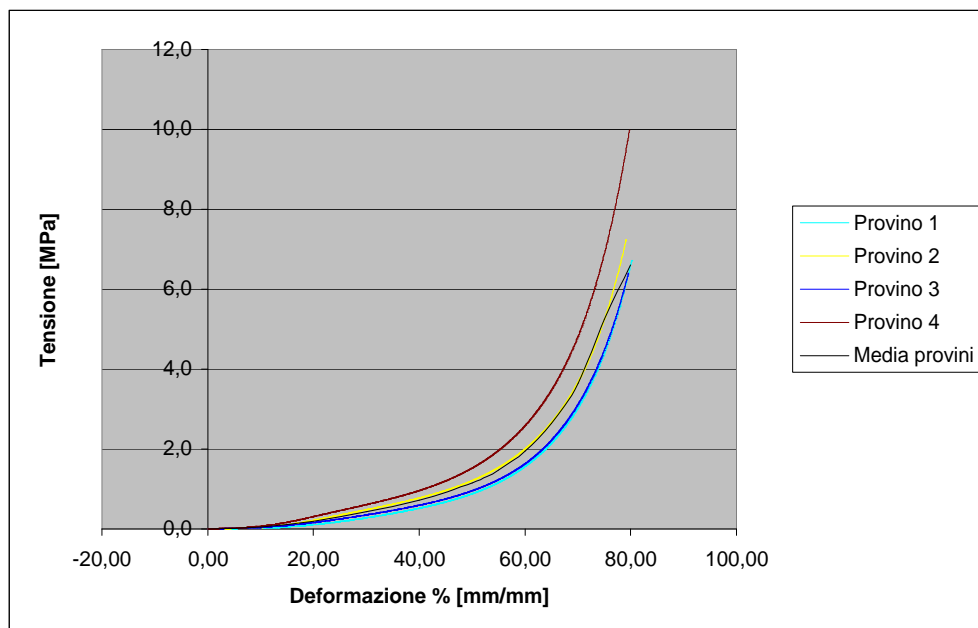


Grafico 3.4 – Relazione tra tensione-deformazione sui provini testati

Come si può notare dal Grafico 3.4 sull’asse delle ascisse compare la deformazione % intesa come:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_{in}} 100 \text{ [mm/mm]}$$

dove con:

$$\Delta l = l_{fin} - l_{in}$$

si intende di quanto si comprime il provino, valore impostato nella pressa (l_{fin} =spessore finale, l_{in} =spessore iniziale).

Sull’asse delle ordinate la tensione espressa come:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \text{ [MPa]}$$

dove:

F è la forza applicata dalla macchina

A_0 è la superficie iniziale del provino

Dalle prove di compressione è stato eliminato uno dei cinque provini presenti perché presentava un comportamento anomalo rispetto agli altri provini, ciò è da imputare probabilmente ad un difetto del provino stesso.

Dal grafico si nota che alcuni provini hanno “ceduto” prima di altri ed altri sono arrivati a tensioni più elevate, tutto ciò sta a dimostrare il carattere prettamente disomogeneo del materiale fornitoci, ciononostante la curva nera che rappresenta la media dei provini ha un buon andamento ed è questa che è stata presa come riferimento per confrontarla con il modello numerico.

Per poter interpretare al meglio i risultati ottenuti mediante le prove meccaniche è necessario introdurre un modello matematico. Utile al nostro caso è la meccanica del continuo che prende in considerazione lo studio del moto e delle deformazioni (cinematica), lo studio delle tensioni in un continuo (dinamica), la descrizione matematica delle leggi fondamentali della fisica che regolano i moti dei mezzi continui (principi di bilancio).

L'assunzione fondamentale alla base di tutto, consiste nel considerare un corpo come avente una distribuzione continua di materia nello spazio e nel tempo. Il corpo viene immaginato come composto da un insieme di particelle continue (o punti materiali). Una tipica particella continua è un accumulo di un gran numero di molecole, piccola abbastanza da esser considerata comunque una particella e il comportamento di una particella continua è una conseguenza del comportamento complessivo di tutte le molecole che la compongono.

Così, lo studio macroscopico riguarda la meccanica di un corpo nel quale sia la massa che il volume sono funzioni continue delle particelle continue. Un corpo di questo tipo è chiamato corpo continuo o semplicemente continuo. Un continuo è definito da quantità macroscopiche e possiede dimensioni macroscopiche molto più grandi degli spazi intermolecolari.

Un materiale si dice *elastico* se lo stato tensionale in un istante t dipende unicamente dalla deformazione in quell'istante e non dalla storia di deformazione.

L'*equazione costitutiva* di un materiale elastico consente di mettere in relazione il tensore degli sforzi $\sigma = \sigma(\mathbf{x}, t)$ in ogni posizione $\mathbf{x} = \chi(\mathbf{X}, t)$ con il gradiente di deformazione $\mathbf{F} = \mathbf{F}(\mathbf{X}, t) = \frac{\partial \chi}{\partial \mathbf{X}}$

Formalmente un'equazione può essere espressa come segue:

$$\sigma(\mathbf{x}, t) = g(\mathbf{F}(\mathbf{X}, t), \mathbf{X})$$

In particolare, per un materiale omogeneo, σ non dipende direttamente da \mathbf{X} , pertanto la precedente si semplifica in:

$$\sigma = g(\mathbf{F})$$

Condizione fondamentale cui deve soddisfare un'equazione costitutiva è l'invarianza rispetto al sistema di riferimento, nel senso che se l'equazione costitutiva è soddisfatta per un determinato processo dinamico (σ, χ) essa deve essere soddisfatta anche con qualsiasi processo del tipo (σ^*, χ^*) collegato al primo tramite una trasformazione Euclidea. Tale assioma fondamentale prende il nome di *Principio di oggettività*.

Una sottoclasse dei materiali elastici sono i materiali *iperelastici*, cioè materiali che non dissipano energia. Per tali materiali è possibile introdurre un'energia libera di Helmholtz Ψ , definita per unità di volume, che consente di individuare il tensore degli sforzi in funzione dei parametri cinematici. Nel caso di materiale omogeneo essa dipende solo dal gradiente di deformazione o da un qualsiasi altro tensore indicativo dello stato di deformazione, come ad esempio il tensore sinistro di Cauchy $\mathbf{C} = \mathbf{F}^T \mathbf{F}$, o il tensore di Finger $\mathbf{b} = \mathbf{F} \mathbf{F}^T$. In tali ipotesi la funzione Ψ prende il nome di strain-energy function. Sfruttando il principio di oggettività è possibile scrivere la funzione g nel seguente modo:

$$\sigma = g(\mathbf{F}) = \mathbf{J}^{-1} \frac{\partial \Psi(\mathbf{F})}{\partial \mathbf{F}} \mathbf{F}^T = \mathbf{J}^{-1} \mathbf{F} \left(\frac{\partial \Psi(\mathbf{F})}{\partial \mathbf{F}} \right)^T$$

avendo indicato con J il determinante di \mathbf{F} .

Se si fa l'ulteriore ipotesi che il materiale iperelastico, oltre ad essere omogeneo sia anche isotropo, si ha:

$$\Psi(\mathbf{F}) = \Psi(\mathbf{F} \mathbf{Q}^T)$$

per tutti i tensori \mathbf{F} con $\det \mathbf{F} > 0$, e per tutti i tensori ortogonali \mathbf{Q} in cui Ψ è la funzione energia. In altre parole un materiale si definisce isotropo se la *strain-energy function* è la stessa qualora la configurazione di riferimento sia ruotata o traslata rigidamente in modo arbitrario.

Si noti come Ψ sia una funzione scalare avente come argomento una grandezza tensoriale. Si è visto che per un materiale isotropo Ψ non varia se al moto venga sovrapposta una rotazione rigida. In tale ipotesi Ψ può essere espressa come funzione degli invarianti scalari del suo argomento. Se si esprime la *strain-energy function* in funzione di \mathbf{C} (risp. \mathbf{b}) allora è possibile scrivere:

$$\Psi = \Psi[I_1(\mathbf{C}), I_2(\mathbf{C}), I_3(\mathbf{C})] = \Psi[I_1(\mathbf{b}), I_2(\mathbf{b}), I_3(\mathbf{b})]$$

dove dette $C_{i,j}$ (con $i, j=1, 2, 3$) le componenti del tensore \mathbf{C} :

$$I_1(\mathbf{C}) = \text{tr}(\mathbf{C}) = C_{11} + C_{22} + C_{33}$$

$$I_2(\mathbf{C}) = \frac{1}{2} \left[(\text{tr}(\mathbf{C}))^2 - \text{tr}(\mathbf{C}^2) \right]$$

$$I_3(\mathbf{C}) = \det(\mathbf{C})$$

differenziando rispetto a \mathbf{C} ed applicando il teorema di derivazione delle funzioni composte si ottiene:

$$\frac{\partial \Psi(\mathbf{C})}{\partial \mathbf{C}} = \frac{\partial \Psi}{\partial I_1} \frac{\partial I_1}{\partial \mathbf{C}} + \frac{\partial \Psi}{\partial I_2} \frac{\partial I_2}{\partial \mathbf{C}} + \frac{\partial \Psi}{\partial I_3} \frac{\partial I_3}{\partial \mathbf{C}} = \sum_{a=1}^3 \frac{\partial \Psi}{\partial I_a} \frac{\partial I_a}{\partial \mathbf{C}}$$

Note che siano le espressioni degli invarianti si risale agevolmente alle seguenti relazioni:

$$\frac{\partial I_1}{\partial \mathbf{C}} = \frac{\partial \text{tr} \mathbf{C}}{\partial \mathbf{C}} = \mathbf{I}$$

$$\frac{\partial I_2}{\partial \mathbf{C}} = \frac{1}{2} \left(2 \text{tr} \mathbf{C} \mathbf{I} - \frac{\partial \text{tr} \mathbf{C}^2}{\partial \mathbf{C}} \right) = I_1 \mathbf{I} - \mathbf{C}$$

$$\frac{\partial I_3}{\partial \mathbf{C}} = I_3 \mathbf{C}^{-1}$$

Dove con \mathbf{I} si intende la matrice identità.

Sostituendo nell'espressione di σ diventa:

$$\sigma = g(\mathbf{F}) = \mathbf{J}^{-1} \mathbf{F} \left(\frac{\partial \Psi(\mathbf{F})}{\partial \mathbf{F}} \right)^T = 2 \mathbf{J}^{-1} \mathbf{F} \frac{\partial \Psi(\mathbf{C})}{\partial \mathbf{C}} \mathbf{F}^T$$

sostituendovi l'espressione ricavata per $\frac{\partial \Psi(\mathbf{C})}{\partial \mathbf{C}}$ si ricava:

$$\sigma = 2 \mathbf{J}^{-1} \left[I_3 \frac{\partial \Psi}{\partial I_3} \mathbf{I} + \left(\frac{\partial \Psi}{\partial I_1} + I_1 \frac{\partial \Psi}{\partial I_2} \right) \mathbf{b} - \frac{\partial \Psi}{\partial I_2} \mathbf{b}^2 \right]$$

o in base al teorema di Caley-Hmilton:

$$\sigma = 2 \mathbf{J}^{-1} \left[\left(I_2 \frac{\partial \Psi}{\partial I_2} + I_3 \frac{\partial \Psi}{\partial I_3} \right) \mathbf{I} - \frac{\partial \Psi}{\partial I_1} \mathbf{b} - I_3 \frac{\partial \Psi}{\partial I_2} \mathbf{b}^{-1} \right]$$

Un materiale in cui non è possibile avere cambiamenti di volume, prende il nome di *materiale incompressibile*. Il determinante del gradiente di deformazione è uguale all'unità:

$$\det \mathbf{F} = 1$$

In questi materiali la dipendenza dell'energia dal terzo invariante si può trascurare perché il terzo invariante è costante ed uguale all'unità, sapendo che:

$$I_3 = \det(\mathbf{C}) = \det(\mathbf{F}^T \mathbf{F}) = \det \mathbf{F}^T \det \mathbf{F} = 1 * 1 = 1$$

L'equazione costitutiva per i materiali iperelastici incompressibili isotropi si riduce a:

$$\sigma = -p \mathbf{I} + 2 \frac{\partial \Psi}{\partial I_1} \mathbf{b} - 2 \frac{\partial \Psi}{\partial I_2} \mathbf{b}^{-1}$$

dove p è il moltiplicatore lagrangiano che esprime il vincolo cinematico di incomprimibilità.

Il vincolo di incomprimibilità prende la forma di

$$\lambda_x \lambda_y \lambda_z = 1$$

dove con:

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ si intendono i gradi di allungamento nelle 3 direzioni principali x, y, z

λ_i è legato ad ε_i (la stessa deformazione della fig 4.3.6) con $i = x, y, z$ dalla relazione:

$$\lambda_i = \varepsilon_i + 1.$$

Si vuole ora trovare un'equazione che caratterizzi il materiale in esame e che metta in relazione il legame esistente tra le deformazioni e gli sforzi applicati data una forza di compressione semplice. Una possibile funzione "strain-energy" molto usata in letteratura è l'equazione di Mooney-Rivlin valida per un materiale isotropo:

$$\Psi = c_1 (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) + c_2 (\lambda_1^{-2} + \lambda_2^{-2} + \lambda_3^{-2} - 3) = c_1 (I_1 - 3) + c_2 (I_2 - 3)$$

Si consideri inoltre l'equazione costitutiva di un materiale iperealistico incomprimibile isotropo:

$$\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{I} + 2\frac{\partial\Psi}{\partial I_1}\mathbf{b} - 2\frac{\partial\Psi}{\partial I_2}\mathbf{b}^{-1}$$

Le due derivate dell'energia elastica rispetto ad I_1 e I_2 valgono:

$$\frac{\partial\Psi}{\partial I_1} = C_1 \quad \text{e}$$

$$\frac{\partial\Psi}{\partial I_2} = C_2$$

Quindi l'equazione costitutiva diventa:

$$\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{I} + 2C_1\mathbf{b} - 2C_2\mathbf{b}^{-1}$$

La compressione semplice è rappresentata dalla seguente mappa di trasferimento:

$$\begin{cases} x = \lambda X \\ y = \lambda Y \\ z = \lambda_z Z \end{cases}$$

Si ricordi che le lettere maiuscole rappresentano la configurazione iniziale, mentre le lettere minuscole rappresentano la configurazione finale dopo la deformazione.

Quindi il gradiente di deformazione \mathbf{F} (definito precedentemente) assume la seguente forma:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_z \end{bmatrix}$$

Conseguentemente ci si ricava \mathbf{b} e \mathbf{b}^{-1} :

$$\mathbf{b} = \mathbf{F}\mathbf{F}^T = \begin{bmatrix} \lambda^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda^2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_z^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\lambda^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\lambda^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\lambda_z^2} \end{bmatrix}$$

Per l'ipotesi di incomprimibilità:

$$\det \mathbf{F} = 1 \longrightarrow \lambda^2 \lambda_z = 1$$

Utilizzando il metodo “*semi-inverso*” ovvero conoscendo la “forma” di σ :

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix}$$

e le condizioni al contorno:

$$\sigma_x = \sigma_y = 0$$

perché si suppone che ci sia sforzo solo lungo l'asse z, si applica la:

$$\sigma = -p\mathbf{I} + 2C_1\mathbf{b} - 2C_2\mathbf{b}^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix} = -p \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + 2C_1 \begin{bmatrix} \lambda^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda^2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_z^2 \end{bmatrix} -$$

$$2C_2 \begin{bmatrix} \frac{1}{\lambda^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\lambda^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\lambda_z^2} \end{bmatrix}$$

che espressa in un sistema di equazioni diventa:

$$\begin{cases} \sigma_x = -p + 2C_1\lambda^2 - 2C_2\lambda^{-2} \\ \sigma_y = -p + 2C_1\lambda^2 - 2C_2\lambda^{-2} \\ \sigma_z = -p + 2C_1\lambda_z^2 - 2C_2\lambda_z^{-2} \end{cases}$$

Risolto il sistema tenendo presente la condizione al contorno $\sigma_x = \sigma_y = 0$ si ricava p:

$$p = 2C_1\lambda^2 - 2C_2\lambda^{-2}$$

e quindi σ_z diventa:

$$\sigma_z = -2C_1\lambda^2 + 2C_2\lambda^{-2} + 2C_1\lambda_z^2 - 2C_2\lambda_z^{-2}$$

o anche raccogliendo:

$$\sigma_z = 2C_1(\lambda_z^2 - \lambda^2) + 2C_2(\lambda^{-2} - \lambda_z^{-2})$$

dalla condizione di incomprimibilità

$$\lambda^2 = \lambda_z^{-1}$$

quindi la σ_z diventa:

$$\sigma_z = 2C_1\left(\lambda_z^2 - \frac{1}{\lambda_z}\right) - 2C_2(\lambda_z^{-2} - \lambda_z)$$

Si calcoli ora lo sforzo di Piola in quanto il tensore di Cauchy è definito come:

$$\sigma = \frac{F}{A_{fin}}$$

A_{fin} sta per area finale del provino sottoposto a compressione, mentre lo sforzo di Piola è definito come:

$$\mathbf{P} = \frac{F}{A_{in}}$$

A_{in} indica appunto l'area iniziale

$$\mathbf{P} = J \sigma \mathbf{F}^{-T}$$

Bisogna ora calcolare:

$$\mathbf{F}^{-T} = \begin{bmatrix} \lambda^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_z^{-1} \end{bmatrix}$$

E risolvere la:

$$\mathbf{P} = J \sigma \mathbf{F}^{-T} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_z^{-1} \end{bmatrix}$$

Cioè:

$$P_z = \sigma_z \lambda_z^{-1}$$

$$P_z = 2C_1\left(\lambda_z - \frac{1}{\lambda_z^2}\right) - 2C_2(\lambda_z^{-3} - 1)$$

Ed è questa l'equazione cercata dove si sostituisce al grado di allungamento λ_z la deformazione

ε_z secondo la relazione:

$$\varepsilon_z = \lambda_z - 1 \quad \text{e quindi:} \quad \lambda_z = \varepsilon_z + 1$$

$$P_z = 2C_1 \left(\varepsilon_z + 1 - \frac{1}{(\varepsilon_z + 1)^2} \right) - 2C_2 \left((\varepsilon_z + 1)^{-3} - 1 \right)$$

Questa equazione è stata usata per confrontare il modello con la curva media ottenuta dai risultati sperimentali, il problema è ora calcolare il valore di C_1 e C_2 in maniera tale che la curva del modello descritta dall'equazione di Mooney-Rivlin sia il più possibile vicina alla curva media sperimentale.

Per fare ciò si utilizza il *metodo dei minimi quadrati* applicato allo sforzo di Piola.

I dati consistono in coppie di misure $(\sigma_i; \varepsilon_i)$ dove con σ_i si intende lo sforzo di Piola che corrisponde allo sforzo calcolato sperimentalmente ed ε_i le deformazioni assunte dai provini.

Si vuole adattare i dati con un'equazione che ha la seguente forma:

$$y = A \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) - B(\lambda^{-3} - 1)$$

determinando i coefficienti $A(=2C_1)$ e $B(=2C_2)$ in modo tale che la discrepanza tra i valori delle misure di y_i ed i corrispondenti valori $y=f(y_i)$ sia minima.

Il problema è quello di stabilire il criterio per minimizzare la discrepanza ed ottimizzare le stime dei coefficienti. Per ogni valore arbitrario di A e B si possono calcolare le deviazioni Δy_i tra ciascun valore osservato ed i corrispondenti valori calcolati.

$$\Delta y = y_i - A \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) - B(1 - \lambda^{-3})$$

Attraverso il metodo della massima verosimiglianza è possibile attribuire dei valori A_0 e B_0 tali che la relazione reale tra y e λ sia data da:

$$y(\lambda) = A_0 \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) - B_0(\lambda^{-3} - 1)$$

per ogni dato osservato $\lambda = \lambda_i$ è possibile calcolare la probabilità P_i di ottenere la misura effettivamente osservata y_i assumendo una distribuzione gaussiana con deviazione standard σ_i attorno al valore $y(\lambda_i)$:

$$P_i = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{y_i - y(\lambda_i)}{\sigma_i} \right]^2 \right\}$$

La probabilità di ottenere l'insieme di n dati y_i effettivamente osservati è il prodotto di questa probabilità:

$$P(A_0, B_0) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{y_i - y(\lambda_i)}{\sigma_i} \right]^2 \right\}$$

In modo simile, per ogni valore stimato dei coefficienti A e B, si può calcolare la probabilità di ottenere l'insieme di misure osservate:

$$P(A, B) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta y_i}{\sigma_i} \right)^2 \right\}$$

Il metodo della massima verosimiglianza consiste nel fare l'assunzione che la probabilità data dall'equazione $P(A_0, B_0)$ sia la massima raggiungibile mediante l'equazione $P(A, B)$.

Il primo termine di questa equazione è costante, indipendente dai valori di A e B. Pertanto per massimizzare $P(A, B)$ è equivalente a minimizzare la somma dell'esponente. Si definisce la quantità χ^2 come la somma:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta y_i}{\sigma_i} \right)^2 = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{\sigma_i^2} \left[y_i - A \left(\lambda_i - \frac{1}{\lambda_i^2} \right) - B \left(1 - \frac{1}{\lambda_i^3} \right) \right]^2 \right\}$$

e la si consideri come la misura appropriata della bontà dell'adattamento.

Si è usato il simbolo χ^2 perché la sua distribuzione è proprio $\chi^2(n - \nu)$.

Il metodo per trovare l'adattamento migliore ai dati sarà quindi quello di minimizzare χ^2 , somma pesata del quadrato delle deviazioni e pertanto di trovare l'adattamento che produce la più piccola somma dei quadrati. Tutto ciò giustifica il metodo dei minimi quadrati.

$$y(\lambda) = A_0 \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) - B_0 (\lambda^{-3} - 1)$$

Si consideri ora il caso più semplice in cui le incertezze assolute sono le stesse per ogni y_i . Il valore minimo della funzione χ^2 è dato da quei valori di A e B che danno valore nullo alle derivate parziali di χ^2 rispetto a ciascuno dei coefficienti:

$$\frac{\partial}{\partial A} \chi^2 = \frac{\partial}{\partial A} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^n \left[y_i - A \left(\lambda_i - \frac{1}{\lambda_i^2} \right) - B \left(1 - \frac{1}{\lambda_i^3} \right) \right]^2 \right\} =$$

$$= -\frac{2}{\sigma} \sum_{i=1}^n \left[y_i - A \left(\lambda_i - \frac{1}{\lambda_i^2} \right) - B \left(1 - \frac{1}{\lambda_i^3} \right) \right] \left(\lambda_i - \frac{1}{\lambda_i^2} \right) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial B} \chi^2 = \frac{\partial}{\partial B} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^n \left[y_i - A \left(\lambda_i - \frac{1}{\lambda_i^2} \right) - B \left(1 - \frac{1}{\lambda_i^3} \right) \right]^2 \right\} =$$

$$= -\frac{2}{\sigma} \sum_{i=1}^n \left[y_i - A \left(\lambda_i - \frac{1}{\lambda_i^2} \right) - B \left(1 - \frac{1}{\lambda_i^3} \right) \right] \left(1 - \frac{1}{\lambda_i^3} \right) = 0$$

In cui sono state considerate tutte le deviazioni standard uguali, cioè: $\sigma_i = \sigma$.

Da queste equazioni si ricava il seguente sistema:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n y_i \left(\lambda_i - \frac{1}{\lambda_i^2} \right) = A \sum_{i=1}^n \left(\lambda_i - \frac{1}{\lambda_i^2} \right)^2 + B \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{1}{\lambda_i^3} \right) \left(\lambda_i - \frac{1}{\lambda_i^2} \right) \\ \sum_{i=1}^n y_i \left(1 - \frac{1}{\lambda_i^3} \right) = A \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{1}{\lambda_i^2} \right) \left(\lambda_i - \frac{1}{\lambda_i^3} \right) + B \sum_{i=1}^n \left(\lambda_i - \frac{1}{\lambda_i^3} \right)^2 \end{cases}$$

Si vuole risolvere il sistema per i coefficienti A e B. Questa soluzione darà i valori dei coefficienti per cui χ^2 è minimo. Per risolvere il sistema possiamo affrontare due casi:

uno in cui:

$$A \neq 0$$

$$B = 0$$

che una volta sostituiti i coefficienti nell'equazione, tenendo presente $A(=2C_1)$ e $B(=2C_2)$, corrisponde al modello *Neo-Hookiano* e l'altro in cui:

$$A \neq 0$$

$$B \neq 0$$

che sempre sostituiti nell'equazione, corrisponde al modello di Mooney-Rivlin; questo per vedere quale dei due casi approssima meglio la curva sperimentale.

Affrontando il primo caso in cui $A \neq 0$ e $B = 0$ prima sperimentalmente inserendo valori arbitrari di $A(=2C_1)$ si è arrivati ad un valore di $C_1 = 0,15$ MPa.

Analiticamente poi si risale al valore di C_1 utilizzando una delle due equazioni del sistema sovrastante privata del secondo termine ($B=0$), per l'esattezza:

$$\sum_{i=1}^n y_i \left(\lambda_i - \frac{1}{\lambda_i^2} \right) = A \sum_{i=1}^n \left(\lambda_i - \frac{1}{\lambda_i^2} \right)^2$$

A diventa quindi:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n \left(\lambda_i - \frac{1}{\lambda_i^2} \right)}$$

ora sostituendo i valori sperimentali trovati si ottiene:

$$A = 0,31 \text{ [MPa]}$$

Quindi:

$$C_1 = A/2 = 0,155 \text{ [MPa]}$$

il che si avvicina molto al valore rilevato sperimentalmente come mostra il Grafico 3.5.

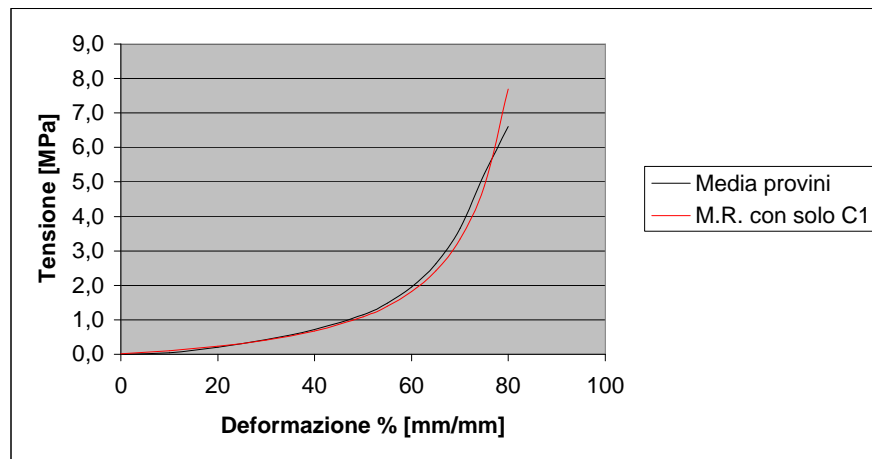


Grafico 3.5 - Curva sperimentale confrontata col modello con solo C_1 .

3.3.2. Prove acustiche di laboratorio

Scopo delle presenti prove è stato quello di testare, dal punto di vista di parametri acustici, la miscela sperimentale prodotta. Infatti, la effettiva utilizzabilità di un prodotto, è attuabile solo se permette di rispettare i valori stabiliti dalla normativa vigente.

Le prime prove di caratterizzazione acustica sono state effettuate presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Ferrara, per poter calcolare l'attenuazione del livello di pressione sonora da calpestio. Per fare ciò è necessario determinare innanzitutto il parametro rigidità dinamica per unità di superficie del materiale in prova.

Le prove preliminari sono state effettuate inizialmente non a norma, per avere dei dati indicativi sulle qualità del materiale ed ottenere dei valori di riferimento per decidere come proseguire il lavoro di analisi. Per i provini a norma il materiale è stato colato in maniera tale che avesse la forma di un parallelepipedo quadrato di lato 20 cm e spessore 1 cm (Foto 3.5).

Il materiale è stato posto su una base metallica sopra il provino è stata posata un'altra piastra metallica delle stesse dimensioni del provino detta piastra di carico (di 7,88 kg) dove è stato posto successivamente un accelerometro che ha la funzione di misurare le frequenze prodotte da un martello strumentato ed inviarle ad un amplificatore di carica ad esso collegato (modello Brüel & Kjaer).

La prova consiste nel sollecitare con degli impulsi la piastra di carico, utilizzando l'apposito martello strumentato collegato ad un condizionatore di carica; l'accelerometro misura le vibrazioni provocate dal martello strumentato. I segnali vengono acquisiti mediante scheda audio

esterna della Roland UA-100 audio canvas con frequenza di campionamento di 44100 Hz, ed elaborati tramite computer. Con un software di elaborazione dedicato (spectralab) si analizza l'intero spettro delle frequenze prodotte dal martello e si rileva la frequenza di risonanza necessaria per il calcolo della rigidità dinamica.

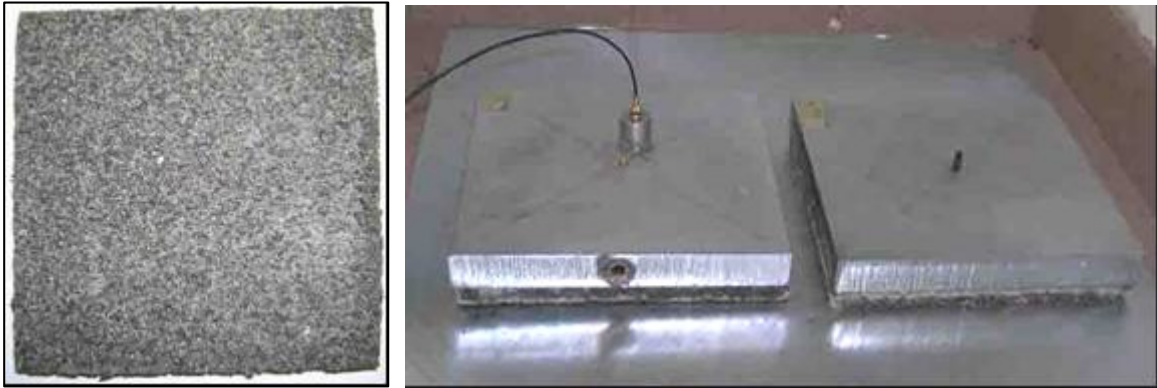


Foto 3.5 – Provino di materiale sperimentale e piastra di carico

E' stato quindi possibile individuare lo spettro sono per i provini testati, i cui risultati sono mostrati nel Grafico 3.6.

Per calcolare la rigidità dinamica complessiva del materiale: $s' = s'_t + s'_a$ secondo quanto dice la norma EN 29052-1 bisogna calcolare la rigidità dinamica apparente s'_t e la rigidità dinamica del gas (l'aria) contenuto all'interno del materiale s'_a .

Per far ciò sono state rilevate le frequenze di risonanza per i diversi provini e conseguentemente la *rigidità dinamica apparente* tramite la formula:

$$s'_t = (2\pi f_r)^2 m'_t \quad [\text{MPa}]$$

dove:

$$m'_t = \text{massa totale per unità di superficie della piastra di carico } \text{kg/m}^2$$

$$f_r = \text{frequenza di risonanza del sistema, Hz.}$$

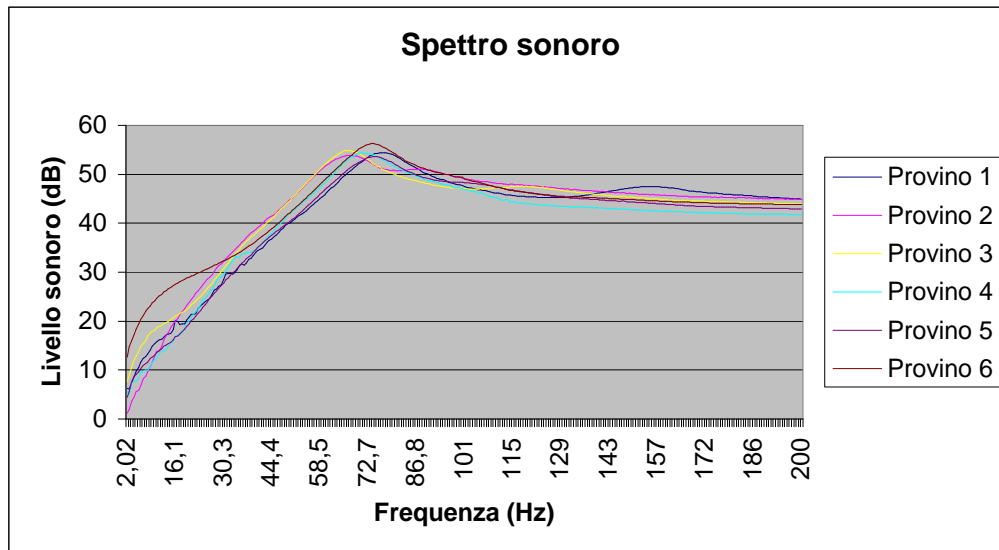


Grafico 3.6 – Relazione tra il livello sonoro e la frequenza su 6 provini testati

Si è quindi proceduto al calcolo della resistenza al flusso d'aria, che calcolata sul materiale in esame risulta:

$$r = 15,9 \left[\frac{kPas}{m^2} \right]$$

Per il successivo calcolo della rigidità dinamica è stata utilizzata la relazione:

$$s' = s'_t + s'_a$$

e quindi è necessario il calcolo della porosità ε per la rigidità dinamica del gas contenuto all'interno del materiale s'_a . Il risultati ottenuti sui campioni analizzati hanno mostrato un valore di porosità ε pari a:

$$\varepsilon = 0,37$$

e si è pertanto potuto calcolare:

$$s'_a = \frac{P_0}{d\varepsilon} = \frac{0,12}{0,0145 * 0,37} = 22,36 \left[\frac{MN}{m^3} \right]$$

il valore medio di s'_t dato dall'equazione risulta quindi:

$$s'_t = 40,6 \left[\frac{MN}{m^3} \right]$$

Quindi la rigidità dinamica risulta:

$$s' = s'_t + s'_a = 62,96 \left[\frac{MN}{m^3} \right]$$

Questo valore, per quanto rispetti la normativa, non descrive correttamente le caratteristiche acustiche del materiale, in quanto dopo essere posato il materiale subisce uno schiacciamento da parte del massetto sovrastante ed il valore della rigidità dinamica apparente tende ad alzarsi.

Per avere dei valori più precisi sono state effettuate delle ulteriori misure sotto carico nel tempo di due provini. L'andamento di s' nell'arco di ventuno giorni è stato verificato in n° 2 provini, i cui risultati sono mostrati nel Grafico 3.7 e Grafico 3.8.

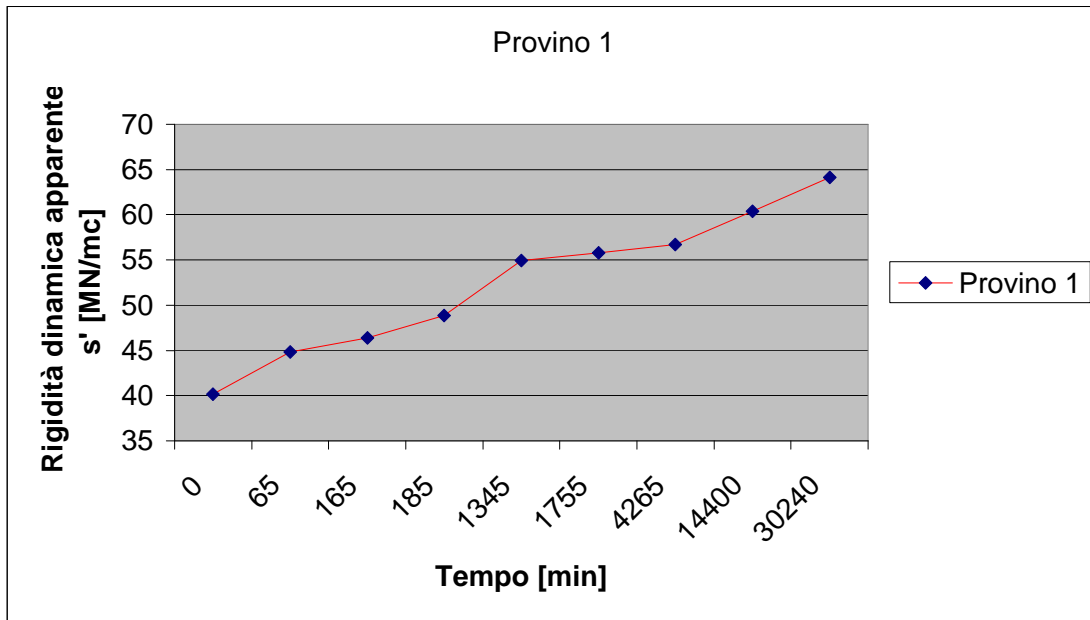


Grafico 3.7 - Rigidità dinamica apparente rispetto al tempo per il 1° provino.

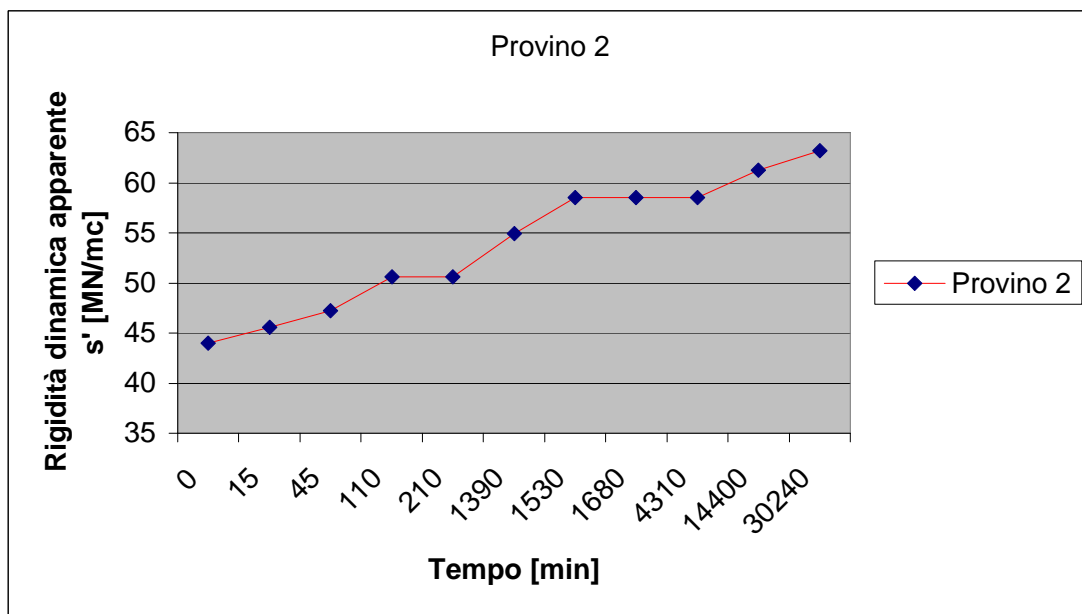


Grafico 3.8 - Rigidità dinamica apparente rispetto al tempo per il 2° provino.

Supponendo di utilizzare il materiale in prova per la realizzazione di un pavimento galleggiante, in cui il massetto è del tipo tradizionale in sabbia/cemento, di densità pari a $1800 \frac{Kg}{m^3}$ per uno spessore di 5 cm, è possibile calcolare la frequenza di risonanza del sistema massa (massetto galleggiante)-molla (materiale resiliente) f_0 :

$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{s'}{m'}} = 160 \sqrt{\frac{62,96}{90}} = 133.8 \text{ [Hz]}$$

E' quindi possibile calcolare l'andamento dell'attenuazione del livello di pressione sonora di calpestio in funzione della frequenza in un massetto di spessore 5 cm (Grafico 3.9).

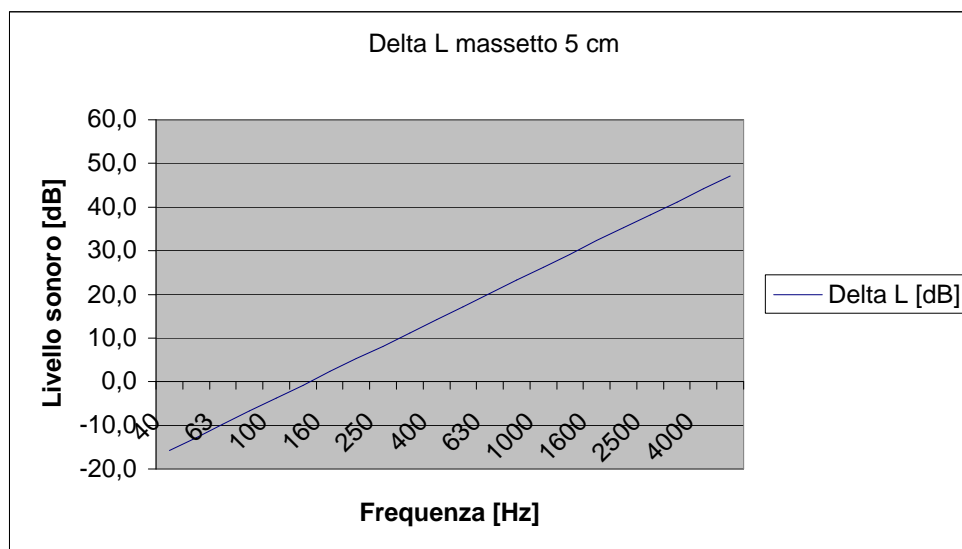


Grafico 3.9 - Attenuazione del livello di pressione sonora di calpestio in funzione della frequenza.

Una seconda serie di prove acustiche “normate” sono state svolte presso il DIENCA dell'Università degli Studi di Bologna, per la determinazione dei livelli di rumore di calpestio ai sensi della UNI EN ISO 140-6 per quanto concerne la prova di solai in laboratorio, e la UNI EN ISO 140-7 per quanto concerne la prova di solai in opera.

In tal caso, trattandosi di una prova normalizzata, si è proceduto innanzitutto a realizzare un'idonea superficie (solaio) di prova rispondente ai requisiti prescritti (Foto 3.6). In particolare è stata “simulata” in laboratorio una pavimentazione reale, chiaramente di piccole dimensioni areali. Si è proceduto con la posa della miscela sperimentale fonoisolante (con tecnica a getto) e quindi dopo 48 ore (tempo per la solidificazione) è stato realizzato sopra il massetto in cemento a presa rapida (dalla società Mapei).



Foto 3.6 – Posa del massetto in cemento sopra lo strato di materiale fonoisolante

La prestazione acustica del solaio, relativa alla propria capacità di ridurre i rumori impattivi, è determinata dal livello di rumore prodotto nel locale sottostante quando il solaio viene sollecitato da una macchina, detta “generatore di rumore di calpestio normalizzato”, costituita da una serie di cinque martelletti di acciaio da 500 gr l’uno posti in linea e fatti cadere in modo ripetitivo da una altezza di 4 cm. Permanendo tale situazione, viene misurato il livello sonoro (per bande d’ottava) nell'ambiente sottostante, con curva di ponderazione (curva che segue l'andamento della sensibilità dell'orecchio umano in funzione della frequenza in un opportuno "range" di livelli sonori).

La macchina generatrice di calpestio per una corretta esecuzione deve essere posizionata sul massetto in quattro posizioni per altrettante quattro posizioni dinamiche. Una volta accesa inizia il suo martellamento per circa 15 minuti. Tale prova chiaramente provoca “micro lesioni” locali sul pavimento stesso, come si può notare nella Foto 3.7.



Foto 3.7 - Effetti degli impatti dei martelli della macchina di calpestio su un massetto di prova

Alla fine della prova è quindi possibile ottenere la curva dell'attenuazione in funzione frequenza. Il parametro caratterizzante viene chiamato "Livello di pressione sonora da calpestio normalizzato" L_n , e risulta pari a:

$$L_n = L_i + 10 \log \frac{A}{A_0} \quad [dB]$$

dove:

L_i = livello medio di pressione sonora da calpestio nel locale ricevente, espresso in dB, misurato in bande di terzi di ottava;

A_0 = 10 m^2 ;

A = area di assorbimento equivalente della camera ricevente, che si determina con la relazione:

$$A = \frac{0.16 V}{T}$$

dove:

V = volume dell'ambiente ricevente, in m^3 ,

T = tempo di riverberazione dell'ambiente ricevente, in secondi.

Per il calcolo si procede innanzitutto con la correzione dei livelli di rumore di calpestio con l'area di assorbimento equivalente; tale passaggio deriva dalla necessità di avere un parametro che risulti indipendente dalle condizioni di assorbimento del locale in cui viene eseguita la misurazione. Per caratterizzare con un unico numero la prestazione acustica di un componente edilizio, si utilizza l'indice di valutazione del parametro considerato.

In questo contesto si definisce "Indice di valutazione del livello di pressione sonora da calpestio normalizzato" $L_{n,w}$ il valore, espresso in dB, determinato in base alla norma UNI EN ISO 717-2, in cui si pone a confronto la curva dei valori misurati con una curva di riferimento definita nella norma stessa, nel campo di frequenza tra 100 e 3150 Hz (Grafico 3.10).

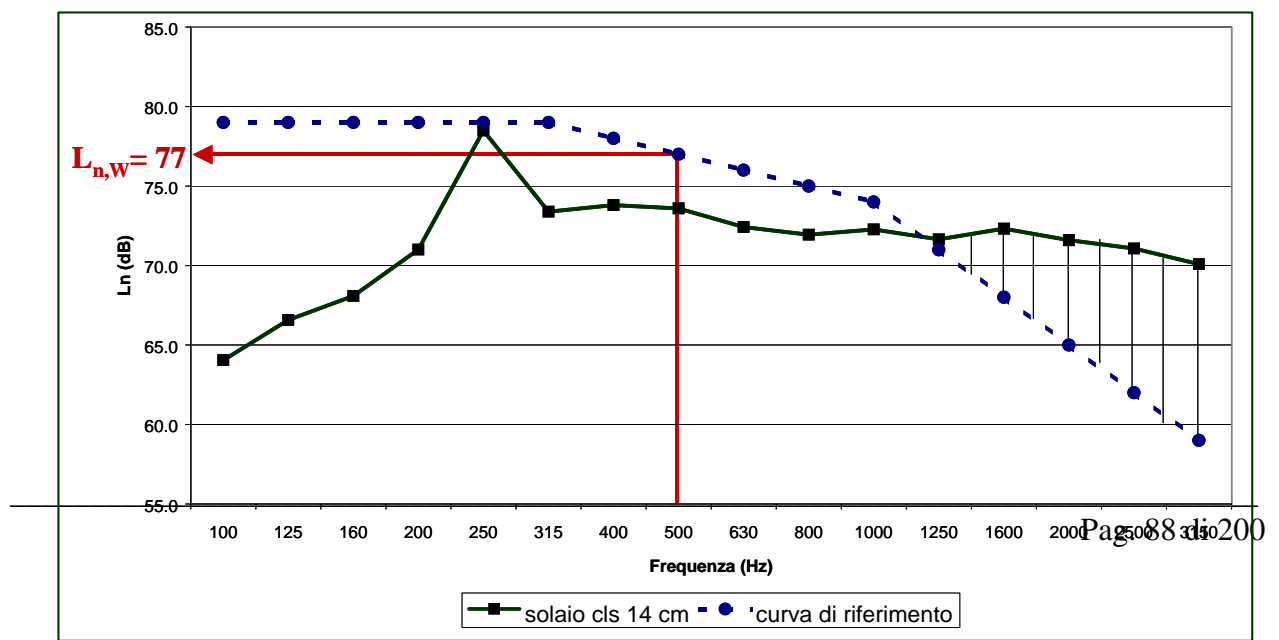


Grafico 3.10 - Determinazione dell'indice di valutazione del livello di calpestio normalizzato

La curva di riferimento viene posizionata sul grafico in modo che la somma, effettuata a tutte le frequenze, delle sole differenze positive tra curva sperimentale curva di riferimento, sia non superiore a 32 dB. L'indice di valutazione viene quindi letto sulla curva di riferimento in corrispondenza della frequenza di 500 Hz. E' chiaro come l'indice di valutazione sia un parametro sintetico della effettiva prestazione del componente, utilizzabile per scelta progettuale di massima, ma che più correttamente deve essere analizzato il comportamento in frequenza.

Ora la valutazione delle prestazioni acustiche di un rivestimento di solaio al fine di determinarne la riduzione del rumore di calpestio viene eseguita per confronto, tra un solaio pesante normalizzato con e senza rivestimento. Come riportato nella normativa di riferimento per la misura in laboratorio UNI EN ISO 140-8, il solaio pesante normalizzato deve essere omogeneo ed uniforme, realizzato con un getto di calcestruzzo armato con uno spessore di 14 cm ed avente una superficie minima di 10 m².

Si definisce attenuazione del livello di pressione sonora da calpestio ΔL , espressa in dB e valutata in banda di terzi di ottava, la seguente differenza:

$$\Delta L = L_{n0} - L_n$$

dove:

L_{n0} = livello di pressione sonora da calpestio normalizzato del solaio pesante normalizzato senza rivestimento di pavimentazione;

L_n = livello di pressione sonora da calpestio normalizzato del solaio pesante normalizzato con il rivestimento di pavimentazione.

Nell'ottica di ritenere valida l'ipotesi della sovrapposizione degli effetti, i valori di ΔL così ottenuti alle varie frequenze per i rivestimenti dei solai possono essere considerati indipendenti dai rispettivi livelli di pressione sonora di calpestio normalizzato del solaio nudo $L_{n,0}$. In tal senso possono quindi essere utilizzati per valutare l'effetto finale che tale rivestimento induce su altre tipologie di solai nudi.

Ai fini della determinazione dell'indice di valutazione ΔL_w , una semplice differenza tra gli indici di valutazione dei livelli di calpestio dei due solai (senza e con il rivestimento di pavimentazione),

sarebbe tuttavia influenzata dalle effettive prestazioni del solaio nudo: per tale motivo è necessario rapportare i valori calcolati di ΔL ad un solaio di riferimento caratterizzato da valori di livello di calpestio $L_{n,r,0}$, come riportato nella norma UNI EN ISO 717-2.

$$L_{n,r} = L_{n,r,0} - \Delta L \quad [dB]$$

Infine si calcola:

$$\Delta L_w = L_{n,r,0,w} - L_{n,r,w} = 78 - L_{n,r,w} \quad [dB]$$

dove:

$L_{n,r}$ = livello di pressione sonora di calpestio normalizzato del solaio di riferimento calcolato con il rivestimento in prova;

$L_{n,r,0}$ = livello di pressione sonora di calpestio normalizzato del solaio di riferimento;

$L_{n,r,w}$, $L_{n,r,0,w}$, sono i rispettivi indici di valutazione.

Una volta determinato il valore di ΔL_w si può procedere al calcolo finale per trovare quanti dB effettivamente passano nella stanza o vano sottostante; secondo la normativa questo valore deve essere minore della soglia massima di 63 dB.

Tutte le misurazioni acustiche sono state effettuate con strumentazione conforme alla classe 1 delle norme EN 60651:1994 e EN 60804:1994.

I risultati ottenuti dalle suddette prove sono riassunti in Tab. 3.1.

Frequenza (Hz)	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500
Lc (solaio con massetto)	51,25	47,06	48,71	63,99	65,17	68,16	69,94	70,25	64,25	65,38	65,4
10log(A/10)	-5,24	-1,18	-5,89	-3,01	-3,41	-2,91	-3,84	-3,84	-2,67	-2,23	-1,28
Ln (solaio con massetto)	46	45,9	42,8	61	61,8	65,2	66,1	66,4	61,6	63,2	64,1
Lc (solaio grezzo)	66,14	58,08	68,51	65,98	69,58	72,22	73,87	83,15	78	79,93	80,07
10log(A/10)	-5,24	-1,18	-5,89	-3,44	-1,89	-3,19	-2,1	-2,22	-2,39	-2,07	-1,5
Ln (solaio grezzo)	60,9	56,9	62,6	62,5	67,7	69	71,8	80,9	75,6	77,9	78,6
Attenuazione DL	14,9	11	19,8	1,6	5,9	3,8	5,7	14,5	14	14,7	14,4
Ln,r				65,4	61,6	64,2	62,8	54,5	55,5	55,3	56,1
Ln,r,0				67	67,5	68	68,5	69	69,5	70	70,5

Frequenza (Hz)	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Lc (solaio con massetto)	61,5	61,17	58,32	55,67	53,72	51,15	47,72	42,71	42,26	44,13
10log(A/10)	-2,27	-0,63	-0,56	-2,05	-0,28	-0,23	-0,23	-0,43	-0,43	-0,43
Ln (solaio con massetto)	59,2	60,5	57,8	53,6	53,4	50,9	47,5	42,3	41,8	43,7

Lc (solaio grezzo)	78,6	78,5	78,29	78,78	79,04	78,8	77,87	76,46	74,05	71,15
10log(A/10)	-1,36	-1,15	-0,8	-0,6	-0,6	-0,38	-0,16	0,03	0,33	0,71
Ln (solaio grezzo)	77,2	77,4	77,5	78,2	78,4	78,4	77,7	76,5	74,4	71,9
Attenuazione DL	18	16,8	19,7	24,6	25	27,5	30,2	34,2	32,5	28,2
Ln,r	53	54,7	52,3	47,4	47	44,5	41,8	37,8		
Ln,r,0	71	71,5	72	72	72	72	72	72		

Tab. 3.1 – Risultati analisi sperimentali nel campo di frequenza tra 50 e 5000 Hz

I valori ottenuti si possono considerare più che buoni. Si è trovato infatti un ΔL_w pari a 23 dB a cui corrisponde un valore di $L_{n,r,w}$ di 55 dB. Tale valore infatti deve risultare inferiore a 63 dB prescritto dalla legislazione vigente per le abitazioni civili.

3.4. Conclusioni

La miscela contenente PFU per applicazione nel settore civile come materiale fonoisolante, ha mostrato parametri acustici in linea con la legislazione vigente. Ovvero, utilizzando tale miscela in opere quali solai (in nuove costruzioni o ristrutturazioni) è possibile abbattere il livello di rumore al calpestio. In particolare l'utilizzo di una miscela che si posa allo stato semiliquido con tecnica "a getto" a numerosi vantaggi operativi ed economici. E' possibile infatti non avere scarti di prodotto e una perfetta adesione al materiale del substrato di appoggio. Inoltre, non essendoci punti di giuntura, ma avendo a che fare con un corpo unico, non si hanno "fughe" di onde sonore, contrariamente a quanto spesso accade con l'utilizzo di pannelli tradizionali fonoisolanti. Si può pertanto affermare che il recupero di PFU all'interno di mescole per tali applicazioni sia un ottimo investimento sia in termini di risorse che ambientali.

4. APPLICAZIONI DEL PFU NELLA REALIZZAZIONI DI CAMPI IN ERBA SINTETICA

In questo capitolo viene analizzato come è possibile utilizzare il PFU nell'ambito della realizzazione di campi da calcio/rugby in erba sintetica. In particolare il PFU può sostituire il materiale inerte (ghiaia o sabbia) di solito presente come materiale da intaso, purché siano rispettate certe condizioni definite nel regolamento della Lega Nazionale Dilettanti (LND) entrato in vigore il 13 febbraio 2006. Al fine dell'attestazione e collaudo dell'intero sistema devono essere infatti eseguite numerose prove sia di laboratorio che in situ (ovvero sul campo realizzato). Dopo una breve descrizione relativa alle modalità costruttive dei campi in erba sintetica, vengono pertanto illustrati i risultati sperimentali ottenuti nell'ambito della realizzazione di un campo da Rugby realizzato a Reggio Emilia.

4.1. Storia e generalità dei campi in erba sintetica

Gli impianti sportivi in erba artificiale sono la nuova rivoluzione del calcio. Una rivoluzione partita dalla Lega Nazionale Dilettanti, che dal 13 Giugno 2001 ricevette dall'allora commissario Figc Gianni Petrucci l'ok per far giocare su questa nuova superficie i campionati della LND e del Settore Giovanile e Scolastico. Quell'anno erano tre i campi omologati. Nel 2002 sono diventati 35, nel 2003 90 e via via sono sempre andati aumentando. Una delle concause di questa apertura è stata, nel 1999, la partecipazione alle Universiadi della nostra nazionale universitaria a Palma di Majorca, in Spagna. Un primo ostacolo da superare fu quello di andare oltre quanto prescrivevano le norme e cioè là dove veniva espressamente indicato che il terreno doveva essere di erba naturale. Partì quindi la formale richiesta all'allora commissario straordinario della Figc Petrucci, che diede la sua approvazione. Avuto l'ok, la Lega fece da collegamento verso le società e fu così che partirono i campi pilota di Manfredonia (Puglia), San Miniato (Toscana), Pretola e San Marco (Umbria) a cui seguirono Capo d'Orlando (Sicilia), Canzo (Lombardia), Loseto (Puglia), Lavagna (Liguria) e Bolzano (Alto Adige).

Stessa strada è stata poi percorsa dalla Lega di Serie C che nell'aprile 2004 ha fatto formale richiesta al Consiglio Federale, ottenendo anche in questo caso parere favorevole.

Dalla stagione 2002/2003 così, la Lega Nazionale Dilettanti ha colto al volo la novità: per coordinare il settore, è stata costituita dal 2001 la Commissione Impianti Sportivi in Erba Artificiale (C.I.S.E.A.), l'unico ente in Italia deputato all'omologazione degli impianti in erba artificiale ed al rilascio del "Certificato di abilitazione allo svolgimento dell'attività agonistica ed amatoriale". Questo mercato è caratterizzato da indici di crescita molto alti sia in Italia che in

Spagna, Germania, Francia e Inghilterra.

A Vienna, il 10 novembre 2004, l'Esecutivo Uefa ha approvato i campi sintetici dopo una propria sperimentazione durata circa 2 anni in diverse città e stadi europei: Almelo (Olanda) Mosca (Russia), Dunfermline (Scozia), Örebro (Svezia) e Salisburgo (Austria). È stata una decisione che ha seguito quella pronunciata a febbraio 2004 dall'International Board, che aveva di fatto dato il via libera alle competizioni su queste nuove superfici. Già dalle scorse edizioni delle coppe europee (Champion's League ma anche Uefa Cup e Intertoto) c'era dunque la possibilità, per chi volesse, di giocare sui nuovi campi artificiali. Anche le qualificazioni al Mondiale 2006 e all'Europeo 2008 hanno avuto l'opportunità di servirsi del "sintetico", eccezion fatta per le fasi finali 2008 e 2012. Il Consiglio Federale si è poi adeguato il 15 marzo 2005, autorizzando per la stagione attualmente in corso l'utilizzo di campi in erba sintetica “purché vengano rispettate le norme e i requisiti tecnici contenuti nel Regolamento internazionale”.

Dal 13 febbraio 2006 è entrato in vigore il nuovo regolamento per i campi in erba artificiale elaborato dalla Lega Nazionale Dilettanti (l'unico ente in Italia che omologa i campi sintetici per l'attività agonistica).

Le principali modifiche rispetto al passato riguardano soprattutto le gomme da intaso da potersi utilizzare in rispetto dell'impatto ambientale e della salute di chi opera nel settore e degli atleti che utilizzano i campi da calcio in erba artificiale. Il Regolamento entra in vigore con norme sempre più restrittive in fatto di eco-compatibilità, e sull'intaso la scelta è chiara: l'utilizzo di prodotti atossici per l'intaso, infatti, è il cavallo di battaglia della LND.

La decisione della LND è stata di accettare “tutte” le gomme vergini (ovvero progettate e fabbricate per essere utilizzate quale intaso nei campi da calcio in erba artificiale) come pure le gomme di pneumatico post uso, purché superino la normativa tossicologica con le restrizioni della LND (vedi normativa DIN 18035-7) e siano nobilitate con opportune verniciature e ciascun granulo sia avvolto e protetto da un film di poliuretano e/o termoplastico, come pure per mezzo di un compound di termoplastico (in cui il polverino o granulo di pneumatico post uso e/o SBR proveniente da altri utilizzi non costituisca più del 30% del peso totale del compound preparato) fuso ad alta temperatura ed estruso in granuli.”

Riassumendo: o si usano gomme vergini, cioè create per questo utilizzo e dunque atossiche; oppure si utilizzano gomme di pneumatico riciclate, a patto che siano nobilitate e comunque avvolte in una capsula che eviti l'eventuale dispersione sul terreno di residui tossici. Da questo consegue che il semplice granulato da PFU non è più accettato per l'utilizzo quale intaso sui campi da calcio in erba artificiale.

I numeri dicono che sono circa 20.000 i campi da calcio sparsi nel nostro territorio e 14-15 mila di questi sono omologati per l'attività della Lega Dilettanti, dalla Serie D a tutto quell'insieme di leghe che sta alla base di quella piramide poi del calcio professionistico, spesso caratterizzate da terreni con manti erbosi decisamente rovinati. La questione poi della pericolosità di certi terreni (gelo, buche, eccetera) salta fuori ad ogni inverno, dato questo a cui concorrono probabilmente il ricorso a scarpini che invece del tradizionale tacchetto rotondo presentano sulla suola le cosiddette lamelle che se da una parte devono permettere al calciatore una presa sul terreno utile per poter rispondere alle esigenze di un calcio sempre più intenso e veloce, dall'altra bloccano maggiormente la scarpa aumentando i rischi per caviglie e (ancor più) ginocchia.

I manti sportivi in erba artificiale sono giocabili in qualsiasi condizione grazie al tipo di fibra ed alle soluzioni costruttive adottate al fine di garantire identiche prestazioni indipendentemente dal periodo dell'anno durante il quale il campo viene utilizzato. Con un campo da gioco in erba artificiale non si vedranno più infatti rinvii ed annullamenti di gare ufficiali a causa delle avverse condizioni climatiche (pioggia, fango, neve...).

Un'altra differenza principale tra l'erba artificiale e l'erba naturale è che la prima può essere soggetta ad un uso più intensivo. Un campo in erba naturale può essere utilizzato mediamente 250 ore, massimo 300 l'anno, mentre un campo in erba artificiale è utilizzabile 7 giorni su 7.

Allo stesso modo viene inoltre garantita l'omogeneità della qualità del manto erboso su tutta la superficie del campo: non si vedranno più infatti zone del campo dove l'erba non riesce a ricrescere a causa dell'intensa attività di gioco (area di porta, centrocampo).

Per quanto riguarda le caratteristiche dei campi, se da un lato la tecnica calcistica è sempre più elevata e i giocatori sono chiamati sempre più a praticare un calcio tecnicamente perfetto, dall'altra parte il supporto su cui questo gioco prende vita deve essere sempre più standardizzato, deve cioè mantenere le stesse caratteristiche a qualsiasi latitudine e longitudine del mondo. Ecco dunque perché la politica della FIFA, la Federazione internazionale, guarda anche alla diffusione di campi in erba sintetica e impone l'adozione di un unico standard di riferimento. Il risultato deve essere unico, o quanto meno molto simile, in tutto il globo, così da evitare che le partite siano condizionate da determinate caratteristiche della superficie di gioco (l'esempio più famoso in Italia è l'erba del San Siro) o dalle conseguenze di eventi meteorologici (piogge abbondanti ecc.). Con il campo in erba sintetica e con il rispetto dello standard "2 Star" della FIFA tutto questo non dovrebbe succedere più. Innanzitutto perché un campo in erba sintetica ha caratteristiche di permeabilità e di drenaggio tali da limitare al massimo condizioni di impraticabilità. E poi perché, appunto, con il materiale sintetico si possono realizzare campi sostanzialmente identici, sia come altezza dell'erba che come substrato. Non che tutto ciò sia stato raggiunto con facilità. Va detto

infatti che ora si è arrivati alla terza generazione in questi tipi di campo. La prima generazione è nata negli Stati Uniti, circa trent'anni fa, ed era studiata appositamente per il football americano. In sostanza si trattava di poco più di una moquette, alta circa 15 millimetri. Poi si è scoperto il sintetico anche nel tennis, con erba sintetica alta circa 25 millimetri, più rada e intasata con la sabbia. Si trattava però di un campo non ancora del tutto adatto per il gioco del calcio a causa dell'eccessiva compattezza del terreno, che avrebbe potuto causare problemi fisici ai giocatori. Ecco allora l'arrivo della terza generazione. L'erba è alta 50, 60 millimetri, più rada, e intasata con un misto di sabbia e granuli di gomma nella proporzione, rispettivamente, di 2/5 e 3/5. In questo modo, come dimostrano già alcuni campi realizzati in Italia (sono circa 140 i campi sintetici nel nostro Paese omologati dalla Lega nazionale dilettanti) si può giocare tranquillamente con i 12 tacchetti e senza alcun problema particolare.

Ad ulteriore conferma delle prestazioni ottenute da queste superfici, i massimi organismi competenti (FIFA; UEFA FIGC-LND) hanno inserito nelle specifiche di omologazione dei campi da gioco anche le prestazioni minime garantite dai campi in erba artificiale (valutate con le stesse metodologie e strumentazione impiegate per i campi convenzionali), in tutto e per tutto paragonabili se non addirittura migliori a quelle ottenibili da superfici convenzionali (Fig. 4.1). La sensazione di gioco su erba artificiale è perfetta: i campi sono progettati con caratteristiche tali da avvicinarsi ed in alcuni casi ad eguagliare quelle di un campo in erba naturale.

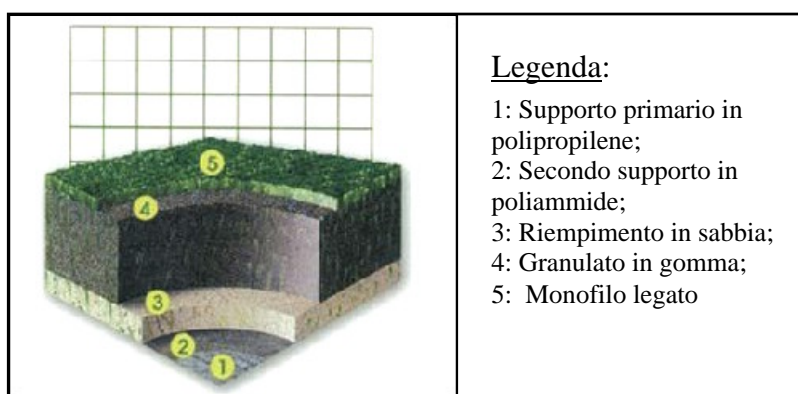


Fig. 4.1 - Sezione tipo di campo in erba sintetica

La pavimentazione del campo offre giocabilità assoluta, con notevoli vantaggi rispetto all'erba naturale che si traducono in: diminuzione dell'affaticamento e dei traumi muscolari; tempi prolungati di utilizzo; minori costi di manutenzione; maggiori prestazioni per uso sportivo. Approvata inizialmente dalla F.I.F.A. e dalla U.E.F.A., in Italia la Lega Nazionale Dilettanti ha elaborato un ottimo protocollo di qualità per l'omologabilità dei campi in erba di "terza generazione" per il calcio che, per ora, possono ospitare competizioni del Campionato di Lega Nazionale Dilettanti e del Settore Giovanile e Scolastico.

4.2. Modalità costruttive di un campo in erba sintetica

Per costruire un campo in erba sintetica di ultima generazione, in modo tale che venga approvato dalla LND, è indispensabile seguire l'apposito regolamento redatto dalla stessa LND ed approvato dalla CISEA (Commissione Impianti Sportivi in Erba Artificiale) il 31 Gennaio 2008.

Gli elementi base per la preparazione del programma di campi con tappeto in erba artificiale sono:

- Caratteristiche prestazionali con test specifici da effettuarsi in laboratorio ed in campo;
- Identificazione dei requisiti tecnici di base richiesti per manti in erba artificiale di terza e/o di ultima generazione;
- Identificazione dei requisiti tecnici di base obbligatori richiesti per i prodotti da intaso (sabbia silicea, granulo elastomerico e prodotti organici);
- Descrizione delle opere di preparazione dei sottofondi;
- Tipologie dei sottofondi;
- Manto in erba artificiale;
- Tipologia degli intasamenti.

Gli elementi valutativi adottati dalla Commissione Federale Impianti Sportivi (C.F.I.S) e successivamente recepiti ed elaborati in termini regolamentari dalla Commissione Impianti Sportivi in Erba Artificiale (C.I.S.E.A.) della LND su schede tecniche, campionature e verifiche d'idoneità effettuate sulla base dei risultati di prove e di analisi di laboratorio, di risultati di prove tecniche eseguite sui terreni di gioco sono:

- 1) Test da eseguire e corrispondenza ai riferimenti normativi;
- 2) Attestazione del sistema rispondente ai riferimenti normativi del regolamento;
- 3) Attestazione dell'intaso di stabilizzazione rispondente ai riferimenti normativi del regolamento;
- 4) Attestazione dell'intaso prestazionale rispondente ai riferimenti normativi del regolamento;
- 5) Attestazione della colla e relativa banda incollata rispondente ai riferimenti normativi del regolamento;
- 6) Attestazione del sottotappeto elastico rispondente ai riferimenti normativi del regolamento;
- 7) Requisiti tecnici del sottofondo e corrispondenza ai riferimenti normativi.

La prima parte del regolamento indica le caratteristiche prestazionali del campo ed identifica i requisiti tecnici di base richiesti sia per i manti in erba artificiale di terza generazione sia per i prodotti da intaso; questa parte sarà presa in esame in maniera approfondita nel capitolo riguardante le prove di laboratorio.

Dal momento che tutti i requisiti prestazionali devono sussistere anche in caso di pioggia, è fondamentale garantire al campo un'adeguata permeabilità; per fare ciò si inizia con la progettazione del sistema di drenaggio del sottofondo, il quale può essere di tipo verticale od orizzontale.

Nei sottofondi a drenaggio verticale viene utilizzato un infiltrometro a doppio anello inserito sulla superficie del sottofondo, con gli strati di inerti drenanti, in modo che l'acqua sia costretta a penetrare verticalmente.

Nei sottofondi a drenaggio orizzontale sotto il manto, l'acqua scorre in modo orizzontale sotto il manto e viene utilizzato un infiltrometro a doppio anello inserito sulla superficie del sottofondo, nelle tipologie dei sottofondi con inerti sopra il geodreno; invece, nelle tipologie dei sottofondi che hanno il geodreno direttamente a contatto del manto, l'infiltrometro non verrà utilizzato.

Per geodreno si intende un prodotto tipo “sandwich” dello spessore minimo di 10 mm e massimo di 25 mm canalizzato all'interno per permettere lo scorrimento orizzontale dell'acqua ed avere una resistenza alla compressione di almeno $0,2 \text{ kg}_F/\text{cm}^2$, come pure i tappeti elastici drenanti e modificati con canalizzazioni per svolgere anche la funzione dello scorrimento orizzontale del drenaggio. Tutti i suddetti prodotti devono comunque essere attestati dalla LND o singolarmente o nel “sistema manto” prima del loro impiego nella realizzazione del campo.

Sottofondo con inerti a drenaggio verticale

Una volta eseguito lo scavo, si posa il geotessile da $250 \text{ g}/\text{m}^2$ sul fondo di sbancamento e negli scavi a sezione delle tubazioni, in senso trasversale all'asse principale del campo, sormontato tra telo e telo di cm 30 al fine di rendere omogenea la resistenza ai carichi di pressione.

Successivamente si procede alla posa delle tubazioni drenanti primarie e secondarie per ricevere le acque meteoriche infiltrate: per quelle primarie si dovrà usare un tipo di tubo minimo di diametro 160 mm ma con il $\frac{1}{2}$ tubo inferiore intero e il $\frac{1}{2}$ tubo superiore microforato; per quelle secondarie si userà invece un tipo di tubo minimo di diametro 90 mm ma con il $\frac{1}{4}$ di tubo inferiore intero e i $\frac{3}{4}$ di tubo superiore microforato. Quindi si posano i pozzetti di ispezione in calcestruzzo di sezione interna 40 cm x40 cm, in parte posti fuori dal campo per destinazione, in parte posti alla confluenza delle due tubazioni per la raccolta delle loro acque. L'ultimo pozzetto d'ispezione si realizzerà prima del collegamento al collettore fognario ed avrà sezione di 100 cm x100 cm diaframmato e sifonato.

A questo punto si prosegue con la stratigrafia a granulometria decrescente, tenendo conto del fatto che tutto il materiale utilizzato deve essere rigorosamente frantumato a spigoli vivi di pietra di cava, lavato ed esente da polveri e non ghiaia arrotondata.

Il primo strato di riempimento, con massicciata, ha spessore finito di cm 30 con pezzatura variabile tra i 4 e i 7 cm di inerte di cava steso, rullato e compattato con rullo di peso adeguato, con le opportune pendenze stabilite dallo stesso Regolamento, realizzate per mezzo di macchinario (motolivellatore) a controllo laser.

Il secondo strato di riempimento, con pietrisco, ha spessore finito di cm 7 con pezzatura variabile tra i 2,8 e i 3,2 cm di inerte di cava steso, rullato e compattato con rullo di peso adeguato, con le opportune pendenze stabilite dallo stesso Regolamento, realizzate per mezzo di macchinario (motolivellatore) a controllo laser.

Il terzo strato di riempimento, con graniglia, ha spessore finito di cm 4 con pezzatura variabile tra gli 1,2 e gli 1,8 cm di inerte di cava steso, rullato e compattato con rullo di peso adeguato, con le opportune pendenze stabilite dallo stesso Regolamento, realizzate per mezzo di macchinario (motolivellatore) a controllo laser.

L'ultimo, con sabbia da frantoio, è lo strato di riempimento della livelletta di progetto dello spessore finito di cm 3 con pezzatura variabile tra gli 0,2 e gli 0,8 mm di materiale inerte di cava steso, rullato e compattato con rullo di peso adeguato, con le opportune pendenze stabilite dallo stesso Regolamento, realizzate per mezzo di macchinario (motolivellatore) a controllo laser. La finitura a mano dello strato superficiale consiste nell'annaffiatura, rullatura e spazzolatura.

Realizzata la stratigrafia si posiziona una canaletta in calcestruzzo perimetrale, posta fuori dal campo per destinazione, per la raccolta delle acque di drenaggio superficiale, completa di griglia antinfortunistica in metallo, allineata ai pozzetti d'ispezione del drenaggio principale o collegata con tubazione agli stessi, per lo smaltimento delle acque meteoriche superficiali.

Infine lo strato finito del sottofondo deve essere realizzato a quattro falde, fin alla fine del campo per destinazione o fino alle canalette, e falde devono avere un'unica pendenza, che deve essere dichiarata negli elaborati del progetto, da scegliere da un minimo del 0,3% ad un massimo di 0,5% con una tolleranza nella realizzazione di $\pm 0,05\%$.

Nelle Fig. 4.2, Fig. 4.3 e Fig. 4.4 sono mostrati gli schemi tipo che devono essere rispettati per la realizzazione dei suddetti campi.

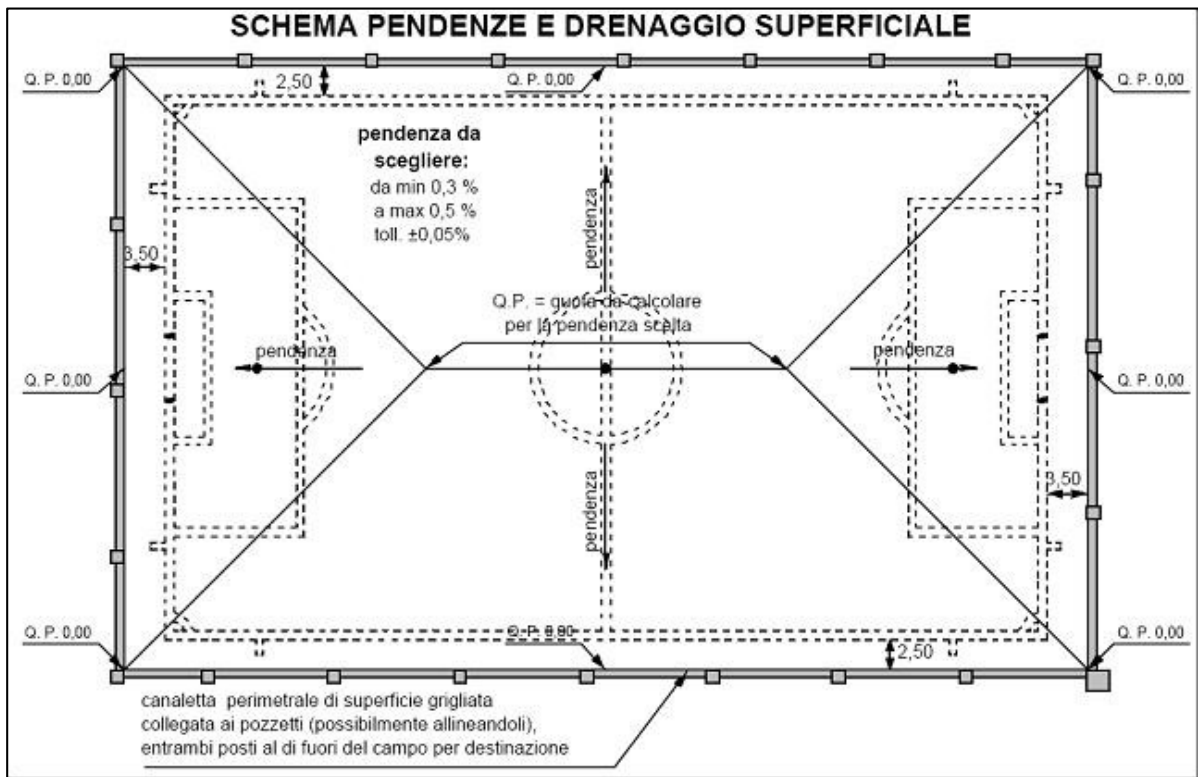


Fig. 4.2 – Planimetria con schema delle pendenze e drenaggio superficiale

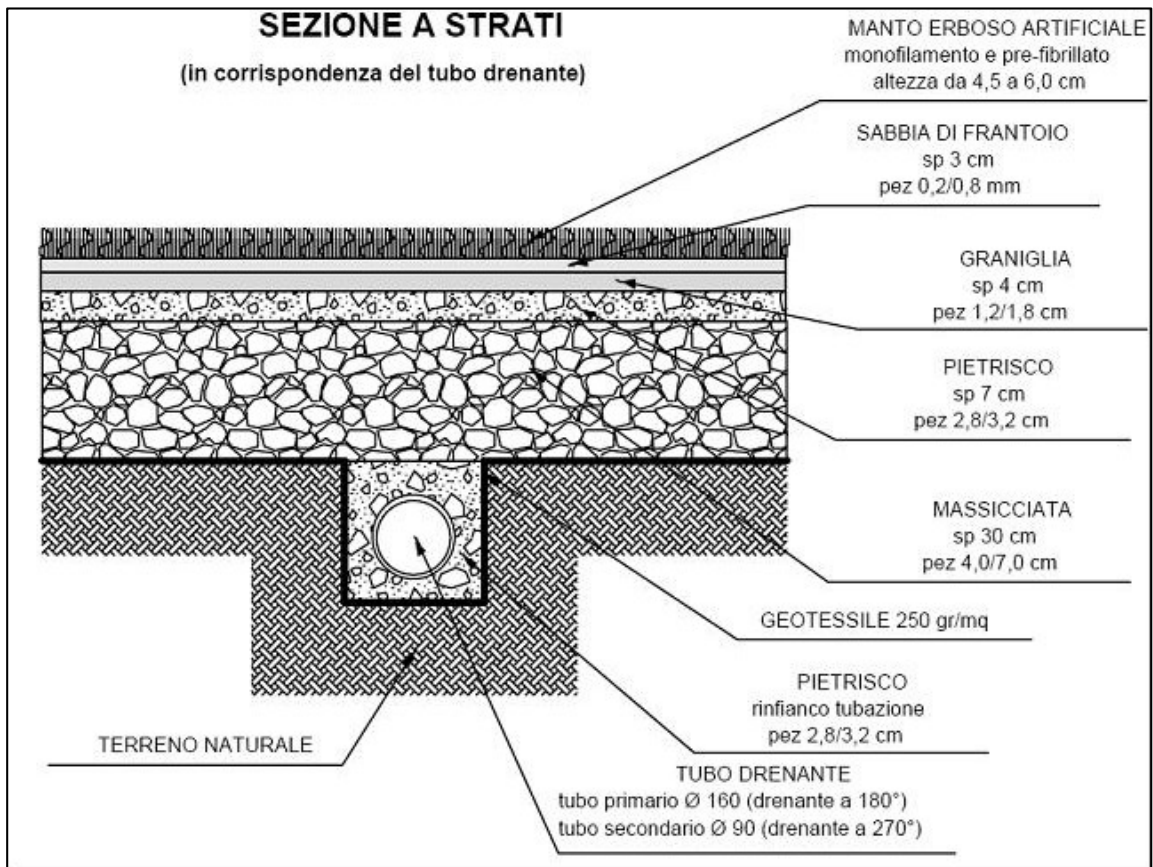


Fig. 4.3 – Sezione tipo a strati in corrispondenza di tubo drenante

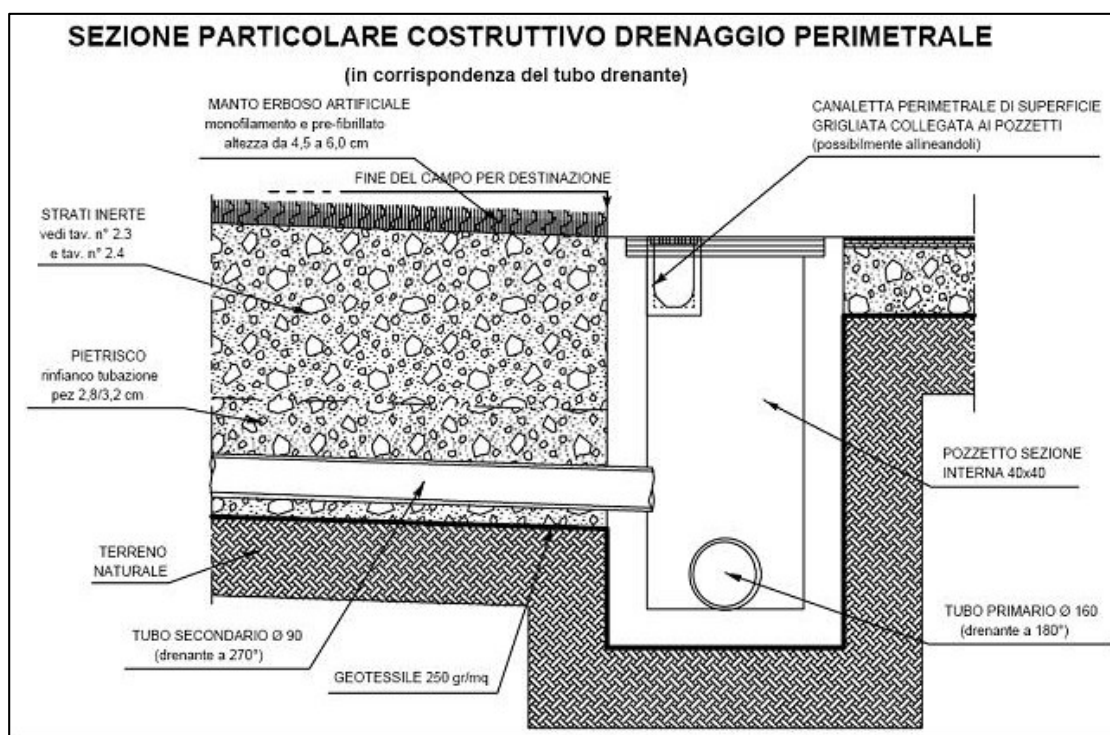


Fig. 4.4 – Sezione tipo particolare costruttivo drenaggio perimetrale

Sottofondo a drenaggio orizzontale sotto il manto

Anche in questo caso la prima fase consiste nella compattazione e scavo: si realizza quindi una livellazione del terreno del campo, con le opportune correzioni del materiale esistente, prefissata nel progetto, con l'esecuzione degli scavi a sezione obbligata per le tubazioni primarie perimetrali ed i pozzetti.

La superficie deve essere debitamente livellata, rullata, compattata corretta e consolidata con l'aggiunta di uno strato di spessore di materiale idoneo (max 10 cm) atto a rendere la superficie consolidata fino al raggiungimento della quota di progetto, secondo le regolari pendenze ottenute con materiali a controllo laser.

La superficie del campo, nel caso di terreni limo-argillosi, difficilmente compattabili, con indice di plasticità superiore a 10, deve essere stabilizzata con calce o cemento per uno spessore di 20 cm e finita secondo le regolari pendenze ottenute con macchinari a controllo laser.

In seguito si posa una membrana impermeabile (guaina) in LDPE (di prima scelta) di polietilene dello spessore di 1,0 mm in teli incollati tra loro, stesa sul terreno esistente compattato o sul terreno stabilizzato con l'apporto di leganti chimici e negli scavi a sezione delle tubazioni, per evitare il passaggio dell'acqua nel terreno sottostante e per trasportarla, con le pendenze già impostate, lateralmente direttamente nella canaletta. I teli dovranno essere posizionati parallelamente al lato corto del campo ed ancorati tra la griglia della canaletta e la canaletta stessa.

Nella fase successiva si posa il geodreno, steso sulla membrana impermeabile. Il sistema nei suoi canali longitudinali trasporterà l'acqua lateralmente fino alle canalette laterali. I prodotti in teli dovranno essere posizionati parallelamente al lato corto del campo, affiancati ed uniti tramite l'incollaggio della sovrapposizione della cimosa. Si posano quindi le tubazioni drenanti primarie perimetrali per ricevere le acque meteoriche infiltrate e trasportate lateralmente dal sistema membrana-geodreno, con un tubo di diametro minimo 250 mm microforato a 180°. Si posano poi i pozzetti di ispezione in calcestruzzo di sezione interna 40 cm x 40 cm, posti fuori dal campo per destinazione, che dovranno essere sei, tre per ogni lato lungo, due agli estremi ed uno al centro. L'ultimo pozzetto di ispezione si posa prima del collegamento al collettore fognario, e deve avere sezione 100 cm x 100 cm diaframmato e sifonato.

Nella Fig. 4.5 e Fig. 4.6 sono mostrati gli schemi tipo che devono essere rispettati nell'esecuzione di tale opera.

La fase successiva consiste nel posizionamento di una canaletta in calcestruzzo, solo sui due lati lunghi. Posta fuori dal campo per destinazione, per la raccolta delle acque di drenaggio superficiale, completa di griglia antinfortunistica in metallo, allineata ai pozzetti d'ispezione del drenaggio principale o collegata con tubazione agli stessi, per lo smaltimento delle acque meteoriche superficiali. Nei due lati corti si realizzerà invece un cordolo che segua la pendenza delle due falde del campo.

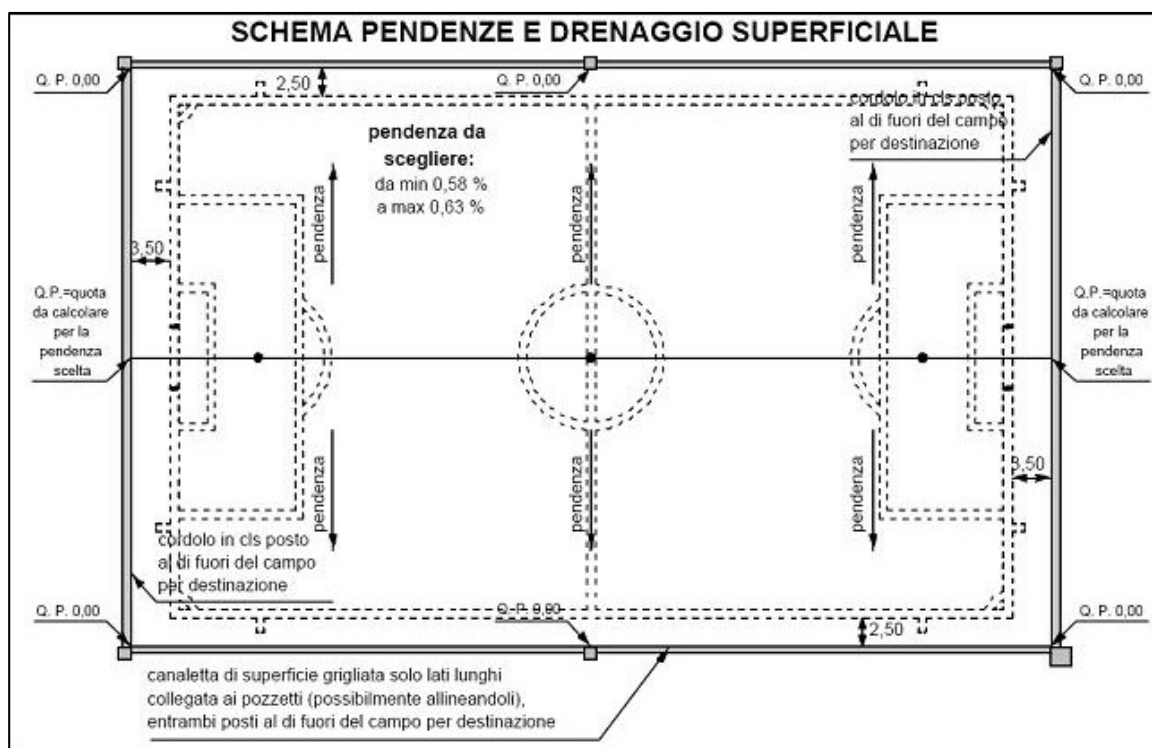


Fig. 4.5 – Planimetria schema tipo pendenze a drenaggio superficiale

Lo strato finito del sottofondo deve essere realizzato a due falde verso i lati lunghi, fino alla fine del campo per destinazione o fino alle canalette. Le falde devono avere un'unica pendenza, che deve essere dichiarata negli elaborati del progetto, da scegliere da un minimo di 0,58% ad un massimo di 0,63%.

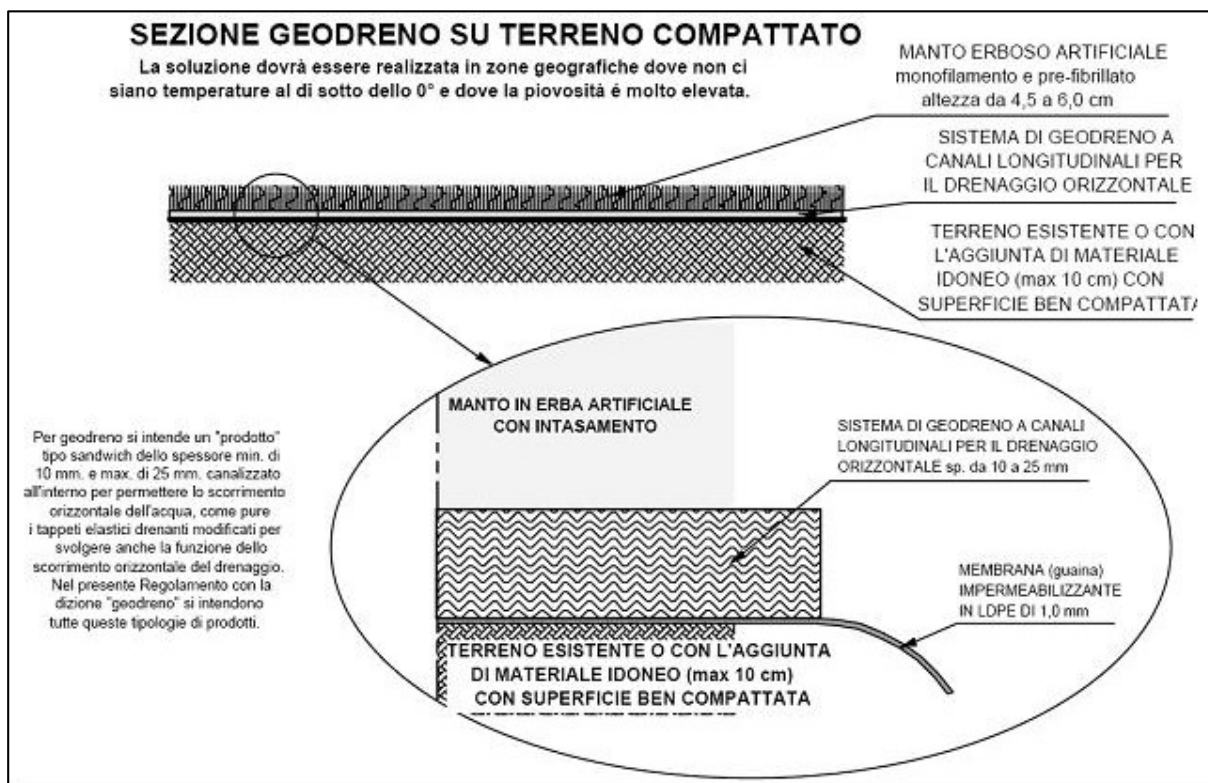


Fig. 4.6 – Sezione tipo geodreno su terreno compatto

Indipendentemente dalla tipologia di sottofondo impiegata si realizza in seguito un impianto di irrigazione adeguato alle esigenze del campo con gli irrigatori (sia a cannoncino che a scomparsa nel terreno) posizionati al di fuori del campo per destinazione, ma comunque il più lontano possibile dalle linee di gioco che perimetrano il campo.

Si sottolinea comunque che l'irrigazione del campo serve principalmente per diminuire la temperatura al suolo che si genererebbe nei mesi caldi, per stabilizzare l'intasamento e, se ritenuto opportuno, per rendere la superficie veloce per lo scorrimento del pallone e quindi del gioco ed in ultima analisi per ovviare nei mesi caldi e/o secchi ed assolati, dal punto di vista geografico, alla scarsa piovosità.

Eseguite tutte le suddette operazioni si procede alla realizzazione del manto erboso artificiale vero e proprio.

La planarità dello strato superiore del sottofondo e, comunque, della superficie di appoggio del manto non può presentare difformità superiori ai 2 mm su 300 mm e 10 mm su 3000 mm, pena l'invalidità ed inefficacia del collaudo del sottofondo.

Dopo aver realizzato il picchettamento specifico del terreno di gioco (misurazione delle linee di marcatura, posizione delle porte e delle bandierine di corner (nel caso dei campi da calcio), si procede alla stesura dei rotoli di manto erboso artificiale, che commercialmente vengono tessuti con una larghezza di circa 4,1 m per favorire la minor quantità di giunzione nella superficie da gioco.

A stesura completata, si procede all'incollaggio delle giunzioni mediante l'impiego di un nastro plastico specifico di una larghezza di 40 cm, sul quale si incollano, con collanti a base di poliuretano bicomponente, le cimose dei rotoli. Dopo aver eseguito l'incollaggio delle cimose e dopo la loro completa essiccazione, si procede alla realizzazione della tracciatura delle linee, che viene effettuata mediante l'inserimento, sul manto erboso artificiale, dei rotoli delle linee di colore bianco delle dimensioni regolamentari aventi le stesse caratteristiche del manto erboso. Per le giunzioni si procede con lo stesso sistema usato per la giunzione delle cimose dei rotoli.

Per la prima fase dell'intasamento, si procede all'introduzione della sabbia silicea se prevista per questo tipo di manto. L'introduzione si realizza con l'impiego di una macchina esclusiva progettata per applicare l'esatta quantità in chilogrammi di sabbia silicea per metro quadrato di manto erboso artificiale, punto molto importante dato che se ci fosse un riempimento incontrollato, questo potrebbe pregiudicare il risultato finale della superficie di gioco.

La quantità di sabbia silicea introdotta per questo strato di intasamento è tale da impedire al manto di muoversi, mantenendo la rigatura perfettamente retta, oltre che contribuire all'ottenimento dei requisiti dell'assorbimento dello shock. L'operazione d'intasamento della sabbia deve avvenire con sabbia e manto erboso asciutti e neppure umidi ed in giornate preferibilmente soleggiate.

Successivamente si procede alla spazzolatura generale di tutta la superficie affinché la sabbia sia distribuita in modo omogeneo sulla stessa e si possa così iniziare l'introduzione dei granuli di gomma.

Una volta effettuata la spazzolatura preventiva si introduce, mediante l'impiego di macchinario esclusivo e progettato per questa lavorazione, e naturalmente per applicare l'esatta quantità in chilogrammi per metro quadrato, il granulo di gomma od organico. Questo sarà nella quantità adeguata affinché la risposta di elasticità e flessibilità del sistema sia ottimale per i risultati prestazionali del manto e, di conseguenza, per la pratica sportiva.

Al termine dell'intasamento si procede alla spazzolatura generale di tutta la superficie con l'apposito macchinario, ultimando così l'installazione del manto in erba artificiale.

Anche per questa operazione si raccomanda di operare in ambiente asciutto e con prodotto asciutto.

La quantità di gomma o di organico inserito in questa fase di intaso rappresenta circa i 2/3 della quantità totale necessaria. Ciò per permettere che avvenga l'assestamento e quindi possa crearsi lo spazio per l'introduzione della quantità rimanente. Una volta completato definitivamente l'intasamento, il campo dovrà essere utilizzato intensamente a tutto campo per almeno 80-90 giorni perché si ottenga un manto idoneo per sostenere le prove di omologazione.

Di seguito si riportano in Tab. 4.1 e in Tab. 4.2 i requisiti tecnici obbligatori per i materiali da intasamento di stabilizzazione e prestazionali.

Quantità di silice	Silicea, lavata, depolverizzata ed essicata con minimo 85% di silice con granuli di forma irregolare ma a spigoli arrotondati – tondeggiante (onde evitare il danneggiamento dell'erba artificiale)
Forma geometrica dei granuli al microscopio	Irregolare ma a spigoli arrotondati - tondeggiante
Indice di friabilità	< 20%
Distribuzione granulometrica (mm)	$d \geq 0,4$; $D \leq 1,25$

Tab. 4.1 - Materiali per intaso di stabilizzazione

Caratteristiche	<p>1- Compounds estrusi in granuli a base di gomma termoplastica vergine, privi di componenti riciclati da post consumo e/o sfridi derivanti da lavorazioni inerenti altri settori di utilizzo; così pure estrusi in lastra ed opportunamente tagliati in testa con lame e quindi non fratturati.</p> <p>2- Compounds a <u>base di gomma EPDM</u> vergine (la materia prima non può essere inferiore al 22% del peso totale del compounds) estrusi in granuli e/o lastre poi frantumate in particelle, privi di polvere e di componenti riciclati da post consumo e/o sfridi derivanti da lavorazioni inerenti altri settori di utilizzo.</p> <p>3- Prodotti organici: insieme di particelle e fibre e/o granuli di prodotti organici anche varie, miscelate con <u>un solo tipo di gomma</u>. I prodotti dovranno essere rispondenti alle esigenze delle norme del Regolamento per i prodotti da intaso come pure ad eventuali nuove necessarie normative prese a riferimento dalla LND.</p> <p>4- Prodotti organici rivestiti: granuli di prodotto organico opportunamente rivestiti e quindi incapsulati in film di speciale resina poliuretana esente da inquinanti ed elastica e resistente. Questo rivestimento dovrà rispondere ai requisiti delle normative tossicologiche dette in precedenza.</p> <p>5- <u>Gomma vulcanizzata da pneumatico</u> di autocarro e trasporto leggero post-uso macinati in particelle di pezzatura minuta, lavati, esenti da polveri, da parti metalliche e tela, verniciati, rivestiti e quindi incapsulati con prodotti vergini innocui (processo di nobilitazione), elastici e resistenti, ottenuti in lavorazioni</p>
-----------------	--

	particolari e specifiche. Le particelle o granuli prima delle lavorazioni di verniciatura e di rivestimento dovranno rispondere ai requisiti delle normative tossicologiche definiti sul Regolamento. I granuli così ottenuti vengono denominati “ <u>granuli di gomma nobilitati</u> ”.
Aspetto della superficie dei prodotti di sintesi	Non liscia ma alquanto porosa
Colore dei prodotti di sintesi	Verde, marrone, mix dei due e grigio, non macchianti
Odore	Assenza di odore sgradevole
Distribuzione granulometrica dei prodotti di sintesi (mm)	$d \geq 0,5$; $D \leq 2,5$
Distribuzione granulometrica delle particelle e dei prodotti organici (mm)	Fondo: da 0,0 a 0,315; presenza 0% tolleranza $\pm 8\%$ Da 0,316 a 1,0; presenza max $\leq 20\%$ tolleranza $\pm 8\%$ Da 1,01 a 3,15; presenza max $\leq 70\%$ tolleranza $\pm 8\%$ Da 3,16 a 25,00; presenza max $\leq 10\%$ tolleranza $\pm 8\%$
Distribuzione granulometrica dei granuli di prodotti organici, o granuli rivestiti (mm)	$d \geq 0,5$; $D \leq 3,4$

Tab. 4.2 - Materiali per intaso prestazionale

4.3. Utilizzo di granuli di PFU quale materiale di intaso

Nell’ambito della presente attività di ricerca sono stati studiati, ai fini della realizzazione di un campo da rugby in erba sintetica a Reggio Emilia, dei particolari granuli brevettati dalla società Graneco (FE) denominati GREEN&GO (Foto 4.1).



Foto 4.1 - Campione di granulato prestazionale verde.

Le principali caratteristiche di tale materiale sono:

- Composizione: Miscela di gomme sintetiche;
- Ingredienti: PFU, coloranti atossici, poliuretano;
- Granulometria: irregolare contenuta tra 0.8 e 2,2 mm, con costanza di curva granulometrica;
- Assoluta assenza di materiali estranei e polverosità;
- Assoluta assenza di cariche elettrostatiche;
- Facilità di posa, non presenta nel tempo fenomeni d'impaccamento e polverosità;
- Degradazione pressoché inesistente agli agenti atmosferici ed in particolare ai raggi UV;
- Non interagisce con il tappeto in erba sintetica;
- E' un materiale assolutamente atossico e non cede sostanze nocive all'ambiente (ha infatti superato tutti i test e le analisi previste dalla L.N.D.);
- I granuli di GREEN&GO sono colorati con pigmenti innocui ed estremamente resistenti;
- Alla prova dei cicli d'abrasione su apparecchiatura LISPORT questi granuli non presentano, a fine ciclo, variazioni apprezzabili di colorazione.

Per poter realmente utilizzare i granuli ai fini delle relative applicazioni come materiali da intaso nei campi in erba sintetica, occorre verificare attraverso numerose prove (normate) che essi soddisfino tutti i requisiti di legge. Si è pertanto proceduto a tal fine a eseguire le diverse prove previste, i cui risultati sono di seguito riportati.

4.3.1. Prove normate sui granuli

La prima prova effettuata è stata fatta in riferimento alla normativa EN 71:2002 presso l'Istituto Italiano Sicurezza dei Giocattoli:

- Tipo di Prova: Migrazione di alcuni elementi – 8 metalli pesanti
- Metodo: Norma EN 71: 2002 Parte 3 + A1:2000 + AC:2002
- Principio: Gli elementi solubili sono estratti con acido cloridrico 0,07 N e determinati per via spettrometrica
- Strumento: Spettrometro ICP-Plasma
- Date:
 - Consegna campione: 26/04/2007
 - Inizio prove: 10/05/2007
 - Emissione rapporto: 14/05/2007

Per quanto attiene la modalità di esecuzione della prova la spettrometria ICP (Inductively Coupled Plasma) è una tecnica analitica molto utilizzata che permette la determinazione di un numero

considerevole di elementi come i dieci elementi maggiori: Si, Al, Mg, Fe, Ca, Na, K, Ti, P, Mn e i più comuni elementi in traccia. Questa tecnica permette di effettuare analisi qualitative e quantitative.

Le analisi qualitative consistono nel cercare gli elementi in un campione a composizione non nota attraverso la selezione delle righe dello spettro, eseguendo un confronto con valori di lunghezza d'onda riportati in seguito in apposite tabelle.

Nelle analisi quantitative l'energia emessa è proporzionale al numero di atomi contenuti nel campione. Dalla relazione tra intensità emessa e concentrazione risulta una curva di calibrazione.

La spettrometria ICP mostra però alcuni limiti che riguardano soprattutto la difficoltà di misurare, se non con notevoli difficoltà, i metalli alcalini a più alto peso molecolare come Rb e Cs. Altra difficoltà è che non si possono analizzare gli alogeni che hanno una energia di ionizzazione troppo alta e nemmeno alla temperatura del plasma offrono linee di emissione sufficientemente intense per un'analisi adeguata.

Lo spettrometro ICP usa un plasma ottenuto innescando la formazione di ioni in un flusso di Argon mediante una scarica elettrica e accelerando questi ultimi con un campo magnetico oscillante generato da una bobina di induzione a radiofrequenza. Il continuo apporto di energia da parte della bobina consente di raggiungere temperature di esercizio molto elevate (6000-7000 K) nella zona di eccitazione-osservazione.

La calibrazione dello strumento viene effettuata usando standard sintetici o naturali. Il campione, dopo essere stato solubilizzato, viene introdotto nel nebulizzatore attraverso una pompa peristaltica. Il flusso di Argon funge da carrier e trasporta l'aerosol all'interno della torcia e del plasma.

Le radiazioni emesse vengono focalizzate su un monocromatore che le invia al fotomoltiplicatore e il segnale viene elaborato da un computer.

La camera di nebulizzazione serve per convogliare l'aerosol nella torcia, eliminando le goccioline più grossolane. Può essere di vetro o di materiale resistente alla corrosione. Il campione, introdotto nel plasma sotto forma di aerosol, subisce prima l'evaporazione della fase liquida a cui segue la vaporizzazione e l'atomizzazione degli elementi. I sistemi di nebulizzazione più riproducibili e affidabili sono due: pneumatici, a ultrasuoni. I *nebulizzatori pneumatici* hanno portata pari a circa 1 ml/min, contro i 10 ml/min dei dispositivi usati per l'assorbimento atomico e per quelli a fiamma. I nebulizzatori più diffusi sono:

- *nebulizzatore a flusso coassiale* o di Meinhard, deriva dai nebulizzatori per assorbimento atomico, ma è più piccolo per diminuire la pressione e ridurre la velocità dell'aerosol. E' di vetro quindi fragile e può essere corrosivo dall'acido fluoridrico.

- *nebulizzatore a flusso incrociato* o nebulizzatore trasversale o a effetto Venturi, ha il flusso di Argon diretto perpendicolarmente alla punta del tubicino di aspirazione del campione. E' meno efficiente del precedente, ma è più robusto e si intasa meno.
- *nebulizzatore di Babington*, dove il campione esce da un piccolo foro e viene nebulizzato tangenzialmente dal basso dal flusso di Argon. E' indicato per soluzioni viscosi e di elevato contenuto salino.
- *nebulizzatore a griglie* o di Hildebrand, è costituito da due griglie di platino distanti 2 mm l'una dall'altra. Il campione viene inviato su una griglia insieme al flusso di Argon formando così l'aerosol che passa attraverso l'altra griglia e diventa più fine e meno turbolento. Questo nebulizzatore è molto più efficiente dei precedenti, ma presenta uno svantaggio: nelle maglie possono bloccarsi residui di campione che inquinano le analisi successive.

I *nebulizzatori a ultrasuoni* generano un aerosol molto fine colpendo un film di campione con ultrasuoni. La nebulizzazione è molto spinta, infatti, prima di passare alla torcia, l'aerosol viene pulito dall'eccesso di solvente. Questi nebulizzatori sono fragili, costosi ed è difficile regolare l'energia della sorgente di ultrasuoni.

Oltre ai sistemi di nebulizzazione, sono stati sviluppati altri sistemi di introduzione del campione nel plasma come il sistema degli idruri volatili o il fornello di Massman in cui il campione, incenerito e volatilizzato, viene inviato come vapore (in un flusso di Argon) nel plasma.

La torcia al plasma ha in genere un diametro di 2 cm ed è costituita da due tubi concentrici, solitamente di quarzo. L'estremità finale di questo dispositivo è posta in una bobina di induzione magnetica alimentata da corrente elettrica ad alta radio frequenza. Nel capillare centrale dei tubi di quarzo viene immesso il campione nebulizzato mentre nel tubo esterno l'Argon raffredda la parte più bassa della torcia prima di entrare nel plasma.

Questo dispositivo è detto torcia perché il plasma assume visivamente la forma di una fiamma.

La bobina, percorsa da corrente alternata ad alta frequenza, produce un campo magnetico oscillante che genera (tramite una scarica elettrica) e mantiene il plasma.

Nel plasma si possono distinguere tre zone a diversa temperatura:

- zona cava, in cui arriva il campione (6500-8000 K)
- zona del plasma concentrato (circa 10000 K)
- zona di eccitazione-osservazione (6000-6500 K)

Le radiazioni emesse dalla zona di eccitazione-osservazione del plasma vengono prelevate e focalizzate da una lente sulla fenditura di ingresso del monocromatore, infatti i segnali raccolti vengono inviati su sistemi monocromatori che consentono di rendere la radiazione

elettromagnetica il più possibile monocromatica prima di inviarla al rivelatore.

Quasi tutti i monocromatori nella spettrometria ICP usano come elemento disperdente un reticolo di riflessione concavo o piano. I reticoli concavi, con opportuni accorgimenti, consentono l'analisi simultanea di molti elementi diversi, perciò sono adatti per lavori di routine, mentre i reticoli piani permettono l'analisi sequenziale di diversi elementi e, in genere, vengono usati in modo preferenziale nei lavori di ricerca.

Il sistema di rivelazione sfrutta solitamente i fotomoltiplicatori associati a due sistemi disperdenti: un prisma e un reticolo. Il prisma separa le radiazioni lungo un asse del piano del rivelatore e le focalizza sul reticolo che le disperde lungo un asse ortogonale al primo.

Lo spettro che ne risulta viene focalizzato su un rivelatore: quando una riga di emissione colpisce un'area del rivelatore le cariche elettriche si accumulano e possono essere registrate da un sistema di elaborazione del segnale.

Tutti i sistemi di elaborazione del segnale e di presentazione dei dati sono computerizzati, così come la gestione delle diverse fasi operative. Questo consente notevoli vantaggi per lo scienziato che può scegliere delle righe analitiche, operare correzioni del disturbo di fondo, controllare numerosi parametri (come tempo di integrazione, flussi di argon, generatore di radiofrequenza, alimentazione del nebulizzatore, accensione del plasma,...), memorizzare e visualizzare più curve di calibrazione relative a diversi analiti, memorizzare metodi analitici e spettri di emissione, calcolare parametri statistici, parametri di regressione delle curve di calibrazione, limiti di rivelabilità, rapporto segnale/disturbo.

Nella spettrometria ottica di emissione al plasma, il campione è usualmente alimentato come liquido. All'interno dello strumento esso viene convertito in un aerosol attraverso un processo chiamato nebulizzazione. L'aerosol viene quindi trasportato al plasma dove gli atomi e gli ioni eccitati emettono le loro radiazioni caratteristiche. La radiazione viene rilevata e convertita in un segnale elettrico che l'analista impiega per risalire alla concentrazione.

In Fig. 4.7 è riportato lo schema dei principali componenti di uno spettrometro ad emissione al plasma.

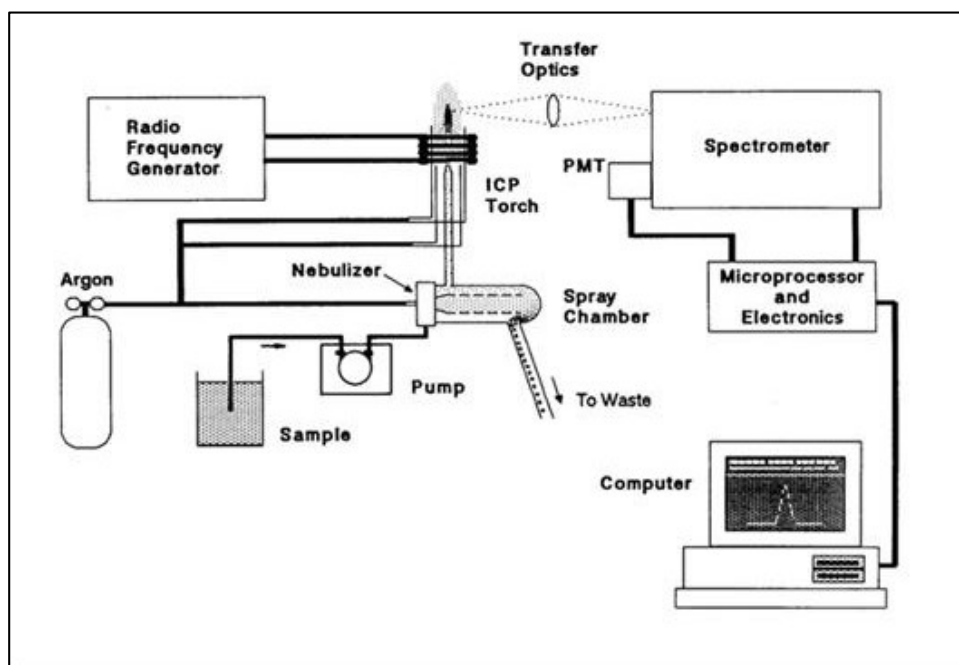


Fig. 4.7 - Schema dei principali componenti di uno spettrometro ad emissione al plasma

I risultati della prova eseguita sono riportati in Tab. 4.3. Tali valori debbono essere confrontati con i limiti della Norma EN 71: 2002, che prevede le seguenti quantità massime espresse in mg/kg: Piombo 90, Cromo 60, Cadmio 75, Mercurio 60, Selenio 600, Antimonio 60, Bario 1000 e Arsenico 25.

Elemento	Pb	Cd	Cr	Ba	Sb	As	Se	Hg
Concentrazione (mg/kg)	<8	<1	<2	<10	<2	<1	<3	<1

Tab. 4.3 – Risultati analisi su campione Green&GO

Il materiale dunque analizzato rispetta pienamente i limiti normativi e risulta pertanto idoneo all'utilizzo come materiale da intaso per i campi in erba sintetica.

Una seconda prova effettuata, sempre in riferimento alla normativa EN 71:2002, è stata fatta per la caratterizzazione del granulo. In tal caso la prova è stata condotta presso il Laboratorio CERISIE (laboratorio per la certificazione e ricerca sui sistemi elastomerici), applicando per le prove le metodiche prescritte dalle seguenti norme UNI:

- 1) **UNI 5613/99** (Elastomeri - Prove su crudi e vulcanizzati - Determinazione del contenuto di ceneri) - *Metodo A*
- 2) **UNI 4908/70** (Elastomeri: prove su crudi e vulcanizzati. Estrazione con solventi.)

Si riportano pertanto di seguito i dettagli delle rispettive analisi e i risultati conseguiti.

1) **Norma UNI 5613/99.** Tale norma si applica alla determinazione delle ceneri nelle mescolanze crude o vulcanizzate a base di uno o più dei seguenti elastomeri e nelle corrispondenti gomme

grezze:

- Poliisopropene di origine naturale o sintetica;
- Copolimeri butadiene-stirene;
- Copolimeri butadiene-acrilonitrile;
- Polibutadieni;
- Copolimeri isobutilene-isoprene e corrispondenti copolimeri alogenati;
- Copolimeri etilene-propilene e relativi terpolimeri;
- Ploicloropreni (solo se in mescolanze crude o vulcanizzate).

Nel metodo A, applicato al presente prova, si fa scaldare il campione all'interno di un crogiuolo fino a quando vengono eliminate tutte le sostanze volatili; si completa dunque l'incenerimento attraverso calcinazione in muffola fino alla totale eliminazione dei residui carboniosi.

Gli strumenti utilizzati sono:

- Crogiuoli di porcellana, quarzo o platino con capacità di circa 25 ml;
- Placca di amianto di forma circolare con diametro di circa 100 mm e spessore di 5 mm, al cui centro viene fatto un foro circolare all'interno del quale si inserirà il crogiuolo, affinché circa un terzo della sua altezza sporga al di sopra della placca stessa;
- Becco Bunsen o altro bruciatore di gas simile;
- Carta da filtro di 150 mm di diametro senza ceneri o con ceneri note;
- Muffola fornita di camino e dispositivo per la circolazione d'aria; infine dispositivo di controllo per mantenere il forno ad una temperatura di 550 ± 25 °C.

Si prendono circa 10 g di campione e li si riducono in foglietta il più possibile sottile per mezzo di un mescolatore a cilindri. Si fa quindi calcinare nella muffola, mantenuta a 550 ± 25 °C, per 30 minuti il crogiuolo vuoto, dopodiché lo si lascia raffreddare all'interno dell'essiccatore fino a quando raggiunge la temperatura ambiente e infine lo si pesa con una precisione di 0,001 g.

A questo punto si mettono all'interno del crogiuolo circa 5 g di mescolanza vulcanizzata, a seconda della quantità di ceneri prevista, e lo si pesa con la stessa precisione di prima.

Si inserisce quindi il crogiuolo nella placca di amianto e se ne scalda il fondo tramite bruciatore a gas, evitando la fuoriuscita del materiale dal crogiolo o l'incendio del campione.

Una volta raggiunta la decomposizione di tutta la gomma e quindi non appena rimane solo una massa carboniosa, si aumenta gradualmente il riscaldamento fino a quando non si svolgono più fumi e nel crogiuolo non rimane altro che una massa carboniosa secca.

Si trasferisce dunque il crogiuolo nella muffola, mantenuta sempre a 550 ± 25 °C, lasciando socchiuso lo sportello in modo da garantire un passaggio d'aria sufficiente ad ossidare il carbone formatosi nel crogiuolo e si prosegue la calcinazione della muffola fino a quando non vi è più la

presenza di particelle carboniose. Si lascia infine raffreddare il crogiuolo contenente le ceneri nell'essiccatore e lo si pesa nuovamente.

Si reintroduce quindi il crogiuolo nella muffola in modo da farlo calcinare per altri 30 minuti, lo si lascia raffreddare nell'essiccatore e si ripete la pesata.

Questa operazione va ripetuta fino a quando la differenza tra due pesate successive non superi l'1% riferito alla quantità di ceneri.

In particolare:

- Data inizio prove: 10/05/2007
- Data fine prove: 17/05/2007
- Emissione Rapporto: 18/05/2007

Di seguito in Tab. 4.1 si riportano i risultati delle prove eseguite.

MANUFATTO	Unità di misura	di GRANULATO GR03-2007	Valore richiesto	Metodi di prova
Contenuto di fibre metalliche	%	< 0,01	≤ 0,1	Metodo interno
Contenuto di fibre tessili	%	< 0,01	≤ 0,5	Metodo interno
Dimensione dei granuli	mm	tra 2,5 e 2,0 (35%)	0,5 – 5	Metodo interno
Estratto in acetone	%	5,52	≤ 22	UNI 4908/70
Contenuto di ceneri	%	5,11	≤ 40	UNI 5613/99 Metodo A
Massa volumica	Mg/m ³	0,52	0,3 – 0,7	ASTM D 5603/01 Item 8
Contenuto di gomma	%	54,7	≥ 40	TGA

Tab. 4.1 – Risultati analisi campione Green&GO

2) **Norma UNI 4908/70.** Per l'esecuzione di tali analisi l'apparecchiatura utilizzata è composta di una bevuta di estrazione, un sifone ed un serpentino refrigerante di rame stagnato. Come solvente si utilizza l'acetone puro per analisi (con punto di ebollizione di 56-57 °C), distillato di recente su Na₂CO₃ o K₂CO₃ anidri. Di seguito in Tab. 4.2 si riportano i risultati delle prove eseguite. Per quanto attiene le modalità di analisi, l'elastomero da sottoporre all'estrazione deve passare per 6 volte attraverso un mescolatore da laboratorio con i cilindri regolati ad una distanza massima di 0,5 mm. Si preleva quindi un campione di circa 2 g e lo si pesa con precisione di 0,001 g. Lo si avvolge poi in carta da filtro e lo si pone nel sifone dell'apparecchiatura. Entro la bevuta si versano 75-100 ml di acetone e si sistema l'apparecchio sulla sorgente di calore. A questo punto si procede all'estrazione, regolando la temperatura in modo che un riempimento ed il susseguente svuotamento del sifone avvengano ogni 3 minuti circa.

Tipo di granulo	Granulato di gomma 1 – 2,2 mm
Stato fisico	Elastomero solido
Colore	Verde
Pigmenti	Atossici
Ricopertura	Poliuretano trasparente atossico
Temperatura di fusione	--
Temperatura di ebollizione	Non applicabile
Punto di infiammabilità	Non misurabile
Auto infiammabilità	350 °C
Pericolo di esplosione	Non esplosivo
Proprietà comburenti	Nessuna
Pressione di vapore	Non applicabile
Densità relativa	0,52 g/cm ³
Soluzione in acqua a 20°C	Non solubile
Contenuto di fibre metalliche	Inferiore a 0,2%
Contenuto di fibre tessili	Inferiore a 0,5%
Contenuto polimerico	Superiore a 40% (riferito al nucleo in SBR)
Metalli pesanti	Entro limiti DIN V18035-7/2002
Estratto acetone	Inferiore a 40% (riferito al nucleo in SBR)

Tab. 4.2 - Caratterizzazione chimico-fisica campione Green&GO

La durata di estrazione non deve essere inferiore alle 8 ore. Su bagnomaria si fa evaporare il solvente nella stessa bevuta dell'estrattore, ovvero in altro recipiente previamente tarato su bilancia analitica. Verso la fine si entrare nel recipiente un flusso di aria depurata, il quale continuerà per circa 10 minuti dopo aver tolto il recipiente dal bagnomaria. Infine si lascia essiccare mantenendo in stufa termostatica per 2 ore alla temperatura di circa 20 °C, si raffredda in essiccatore e si pesa.

É necessario eseguire almeno due determinazioni ed il risultato della prova, espresso in percentuale e riferito alla massa del campione, è dato dalla media dei valori ottenuti nelle varie determinazioni, arrotondato alla prima cifra decimale.

Oltre alle prove precedentemente menzionate altre numerose prove e test devono essere eseguiti per la completa caratterizzazione dei materiali da intaso. Infatti lo stesso regolamento della LND.

Requisiti di base del prodotto da intaso prestazionale <u>obbligatori</u>	Requisiti della LND e del Settore Giovanile Scolastico
Aspetto della superficie dei prodotti di sintesi	Non liscia ma alquanto porosa
Colore dei prodotti di sintesi	Verde, marrone, mix dei due e grigio, non macchianti

Densità apparente dei prodotti di sintesi	Conforme al dichiarato $\pm 5\%$
Resistenza all'abrasione tramite Lisport	Il prodotto non deve subire alterazioni dovute all'abrasione
Distribuzione granulometrica prima dei test dei	$d \geq 0,5 \text{ mm}$ $D \leq 2,5 \text{ mm}$
Distribuzione granulometrica dopo il ciclo di	$d \geq 0,5 \text{ mm}$ $D \leq 2,5 \text{ mm}$
Analisi colorimetrica (scala del grigio) sul prodotto	≥ 3
Resistenza del prodotto all'esposizione UV dei	Il prodotto non deve subire alterazioni dovute all'esposizione
Analisi colorimetrica (scala del grigio) sul prodotto	≥ 3
Analisi quantitativa dopo il ciclo di esposizione UV	Nessuna variazione rispetto all'analisi iniziale
Resistenza del prodotto all'esposizione all'aria/acqua	Il prodotto non deve subire alterazioni dovute all'esposizione
Distribuzione granulometrica dopo il ciclo di	$d \geq 0,5 \text{ mm}$ $D \leq 2,5 \text{ mm}$
Distribuzione granulometrica dopo il ciclo di	$d \geq 0,5 \text{ mm}$ $D \leq 2,5 \text{ mm}$
Analisi colorimetrica (scala del grigio) dopo il ciclo	≥ 3
Analisi colorimetrica (scala del grigio) dopo il ciclo	≥ 3
Analisi quantitativa dopo il ciclo di esposizione	Nessuna variazione rispetto all'analisi iniziale
Analisi per la determinazione della presenza di	Non è ammessa la presenza dei metalli pesanti
Analisi chimica-tossicologica del granulo per la	Rispondente alla tabella definita dallo stesso Regolamento
DIN 18035-7 con restrizioni LND (analisi in	Esami tossicologici per la difesa della salute dell'individuo.
Verifica della presenza di EOX	$\leq 100 \text{ mg/kg}$
Verifica della presenza degli HAP	Assenti

Tab. 4.3 – requisiti prodotto intaso prestazionale.

4.3.2. *Aspetti sanitari e sulla salute derivanti da impiego di PFU*

Da quando l'erba sintetica ha fatto la sua entrata negli stadi e nei centri sportivi, ci si è chiesto se questo nuovo rivestimento non contenga sostanze che possano mettere a rischio la salute degli sportivi e degli spettatori. L'attenzione è rivolta in particolare agli idrocarburi policiclici aromatici (IPA), cancerogeni, che possono essere contenuti nel granulato di gomma dell'erba sintetica.

Nel 2006 in particolare sono usciti sui giornali ed in televisione articoli allarmistici sulla possibilità che i campi sintetici fossero cancerogeni.

Tuttavia, lo stesso anno, risultati divulgati dalla Commissione del Ministero della Salute non giustificano i messaggi di certa dannosità per la salute degli individui apparsi sui media nazionali. La Commissione "Calcio in erba artificiale" del Ministero della Salute dichiara pertanto del tutto infondate le illazioni di stampa: nessuno è autorizzato ad affermare che l'intaso in gomma riciclata da pneumatici, utilizzato nei campi di calcio in erba sintetica, è cancerogeno.

Occorre inoltre evidenziare che numerosi studi e sperimentazioni, prodotti in diversi Paesi Europei, giungono alla conclusione di escludere con convinzione ogni rischio di tossicità per

l'uomo derivante dalla pratica sportiva su di un campo intasato con materiale da recycling di PFU, Ciò è particolarmente importante perché, tutto l'allarmismo creato, derivava esclusivamente dall'aver preso come riferimento normativo la legge relativa alla bonifica dei suoli (legge "471"). Comparazione che aveva fatto peraltro ipotizzare possibili problemi solo per 5 campi sui 15 considerati dei circa 300 fino a questo momento realizzati.

Inquadrato così più correttamente il controllo dei rischi connessi all'introduzione della nuova tecnologia, la Commissione ha cominciato a delineare il secondo obiettivo – senza il quale peraltro anche il primo non avrebbe significato pratico - in merito al quale dovrebbe giungere ad esprimere indicazioni concrete: la stesura di Linee guida che fissino le condizioni da seguire nella realizzazione degli impianti in erba artificiale, a partire naturalmente dai materiali d'intaso, in base alle quali siano normalizzate le responsabilità del mercato come dei diversi soggetti interessati. Uno strumento certamente utile per normalizzare il settore, superando la fase "pionieristica" vissuta da tutti gli interessati nel corso degli ultimi anni. Come è stato sottolineato anche dallo stesso Presidente Verna e dai dirigenti dei Ministeri, il Regolamento della LND riguarda solo una parte dell'utenza interessata all'uso di un campo sportivo. Altre associazioni e privati organizzano infatti manifestazioni distinte da quelle della LND; inoltre sussistono responsabilità esplicite degli Enti locali che sono, nella maggioranza dei casi, anche proprietari degli impianti di cui in questo periodo si parla. E' stata affermata la necessità che le "Linee guida" in via di stesura "vadano oltre" l'impostazione del regolamento della LND, corrispondendo ad una visione più generale della questione. Per esempio, si può fin d'ora prevedere che esse riguarderanno certamente tutti i materiali d'intaso e che il sistema attuale di qualificazione (unico laboratorio accreditato dalla LND) verrà con ogni probabilità superato.

La stessa commissione in oltre intende approfondire le modalità secondo cui:

- il sistema dei produttori di granulato da intaso (vergine o da recycling), possa qualificare presso primari Enti di certificazione il ciclo di lavorazione e la qualità del granulo prodotto da ogni singolo produttore. ARGO, anche facendo tesoro del lavoro già svolto in sede europea per una Technical Specification (CEN) tramite ETRA, si è già attivato in tal senso per ottenerne la disponibilità. La standardizzazione delle modalità produttive fondamentali è infatti premessa indispensabile per qualificare uno specifico prodotto. Si tratta, in fondo, di sviluppare prassi normalmente attuate presso i settori produttivi più maturi, tra cui quelli dei produttori degli altri materiali utilizzati nel campo di calcio (il filo d'erba in materiale polimerico, per es.).
- Le singole imprese produttrici, possano determinare in proprio o presso laboratori chimici

qualificati dall'Istituto Superiore di Sanità e convenzionati da ARGO la corrispondenza delle caratteristiche chimico – fisiche dei propri lotti di produzione agli standard europei in uso. Superare il metodo dell'analisi UNA TANTUM con quello dell'analisi di routine sulle partite di produzione è una premessa indispensabile perchè tutti i cicli di lavorazione siano adeguati alla richiesta effettiva del mercato, Una disponibilità dei produttori che significa trasparenza e volontà di ottenere il riconoscimento dei costi relativi nella catena dei prezzi.

- il mercato possa contribuire alla qualificazione dell'Offerta di materiale da intaso, per via delle responsabilità ad esso connesse nell'offerta dell'attività al pubblico sportivo: qualificazione del prezzo di acquisto, procedure di controllo analitico, controllo degli impatti ambientali connessi alla realizzazione degli impianti sportivi in erba artificiale (al di là della formulazione specifica dei singoli materiali) una volta realizzata l'installazione. Una riflessione che dovrebbe assumere particolare rilievo anche in considerazione del ruolo spesso esercitato dagli Enti locali nella realizzazione degli impianti in questione ; anche in considerazione della responsabilità ad essi attribuita dalla Legge 203/2003 per l'utilizzo di materiale da recycling.
- infine il sistema della ricerca scientifica (privata ed Universitaria) dovrebbe essere sollecitato ad un impegno continuativo - sotto la supervisione dell'Istituto Superiore di Sanità - per un approfondimento sempre più dettagliato degli effetti connessi alle situazioni d'uso indotte dalle nuove tecnologie nella realizzazione dei campi in erba artificiale (ricerca internazionale, controllo degli impatti, monitoraggio circa le variazioni delle caratteristiche chimiche e fisiche del materiale da intaso nel tempo e gli effetti eventuali sulla sua funzione d'uso).

Come detto pertanto gli elementi al centro delle ricerche ancora in corso sono gli IPA, ma anche i metalli pesanti.

A tal fine e visto l'importanza dell'argomento, di seguito si caratterizzeranno questi due aspetti del problema insieme ad una ricerca riguardante i traumi che si possono contrarre giocando, mettendo in relazione i campi sintetici di ultima generazione con i campi naturali.

Gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA) sono una classe di composti organici, costituiti da almeno due anelli benzenici condensati tra loro. In condizioni normali gli IPA si presentano tutti allo stato solido. La tensione di vapore di tali composti è generalmente bassa, ed inversamente proporzionale al numero di anelli contenuti. I composti a peso molecolare basso generalmente

sublimano a temperatura ambiente. Gli IPA sono poco solubili o del tutto insolubili in acqua; la solubilità diminuisce all'aumentare del loro peso molecolare.

La struttura molecolare ne determina la stabilità: in genere, a causa delle notevoli repulsioni elettroniche, la struttura lineare è la meno stabile; la conformazione ripiegata possiede invece minore energia e quindi un guadagno di stabilità.

Il più semplice è il naftalene che, come inquinante, si trova disperso nell'aria in forma gassosa a temperatura ambiente. Ne esistono anche altri, più complessi, che possono presentarsi in forma sia gassosa sia solida. Nella forma più pura si presentano solidi e trasparenti, oppure bianchi o di un colore che va dal giallo chiaro al verde pallido. La struttura del benzene consiste in un anello con sei atomi di carbonio. Quasi tutti gli IPA che presentano più di 4 anelli di benzene sono cancerogeni.

Il benzo(a)pirene (BaP), che conta cinque di questi anelli, svolge un ruolo importante nel calcolo degli IPA. Infatti, il BaP è spesso misurato come sostanza indicatrice degli IPA, dato che il suo tenore nell'insieme di IPA si attesta con relativa costanza al 10 per cento.

Gli IPA sono innanzitutto componenti naturali del carbone e del petrolio, che durante la raffinazione del petrolio si accumulano nel bitume. I prodotti trattati con bitume e catrame di carbone fossile, come l'asfalto, il cartone catramato o il colore di catrame contengono quindi un elevato tenore di questi idrocarburi. Tuttavia, a causa della loro scarsa idrosolubilità e volatilità, gli IPA presenti in questi prodotti si propagano solo limitatamente nell'ambiente.

Ma gli IPA sono anche prodotti secondari generati dalla combustione di materiale organico (carbone, olio da riscaldamento, carburante, legno, tabacco, ecc.) e sono presenti ovunque nell'aria. Gli IPA dell'aria sono generati prevalentemente da questi processi di combustione, ma anche dall'abrasione degli pneumatici, anche se in minima parte (4% del totale).

Anche le derrate alimentari contengono IPA, derivanti sia dall'ambiente circostante che dai processi di produzione. Lo studio di queste miscele è particolarmente complicato, ma è stato dimostrato che l'esposizione alle miscele IPA comporta un aumento dell'insorgenza del cancro.

Gli IPA si possono trovare all'interno dei campi in erba sintetica, infatti le fibre verdi, lunghe circa 7 centimetri in tutto, costituiscono solo una parte del manto erboso sintetico, che per presentare caratteristiche di gioco simili a quelle dell'erba naturale deve comprendere diversi strati. La base è costituita da uno strato di asfalto, sul quale è posato un tappeto elastico che funge da strato di smorzamento, ricoperto a sua volta dalle fibre del manto erboso vero e proprio. Nella parte inferiore, le fibre sono fissate nella sabbia di quarzo, sulla quale viene steso uno strato di granulato di gomma. In Fig. 4.8 è riportato un confronto tra una sezione in manto in erba sintetica e una con riempimento in granuli di PFU.

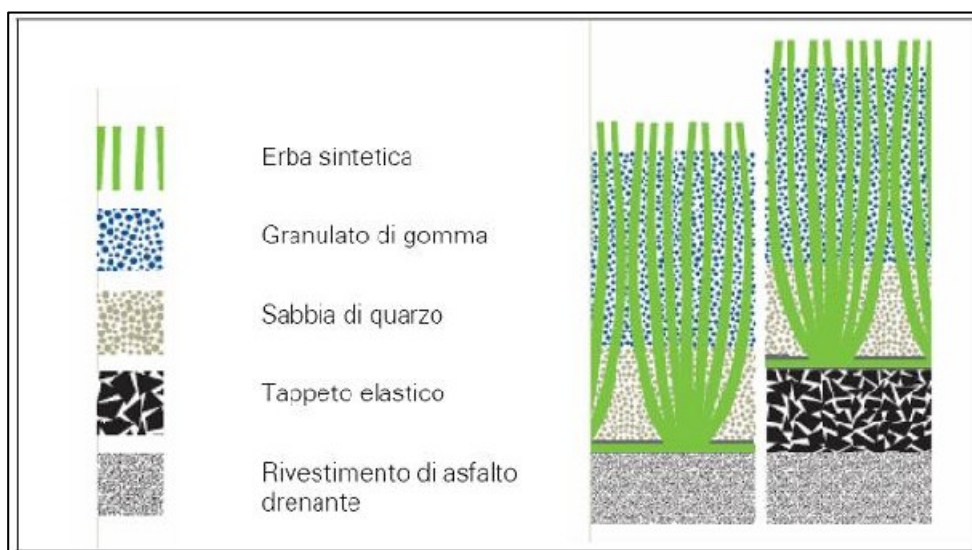


Fig. 4.8 – Confronto tra sezione manto in erba sintetica e con riempimento

È soprattutto il granulato di gomma che può contenere sostanze dannose per la salute. Infatti, la maggior parte dei granulati è prodotta con pneumatici usati, addizionati di oli emollienti per migliorarne le caratteristiche di marcia. Questi oli contengono i cosiddetti idrocarburi policiclici aromatici, IPA, alcuni dei quali sono cancerogeni. La legislazione europea prevede una diminuzione drastica del tenore di IPA negli pneumatici. Tuttavia, in considerazione delle sfide tecniche rappresentate dalla ricerca di sostanze alternative e del tempo necessario per la modifica delle modalità di produzione, questa disposizione diventerà effettiva soltanto nel 2010. I granulati di gomma nuova, utilizzati più raramente per la produzione dell'erba sintetica, contengono circa 50 volte meno IPA rispetto a quelli per lo più usati attualmente.

Le Federazioni calcistiche FIFA e UEFA hanno stabilito precisi requisiti per il rilascio del certificato di omologazione dell'erba sintetica. A tale scopo, sono esaminate le caratteristiche di gioco ed è verificata l'assenza di sostanze nocive per la salute, come i metalli pesanti. Tuttavia, l'esame non tiene conto dei valori IPA. L'erba sintetica certificata può quindi contenere granulato ottenuto con pneumatici usati. Il fabbricante deve invece provare che l'erba sintetica è priva di sostanze che al contatto con la pelle risultino velenose, mutagene, cancerogene o dannose per il feto.

Durante le partite o i lavori di manutenzione, minuscole particelle di granulato possono disperdersi nell'aria.

Mentre le particelle più grandi si depositano rapidamente al suolo, quelle più piccole rimangono a lungo sospese nell'aria e possono quindi essere inalate. Il naso e i bronchi espellono molte delle particelle inalate, ma quelle di diametro inferiore a 10 micrometri (millesimi di millimetro) possono penetrare nei polmoni in profondità, provocando danni locali, oppure entrare nella circolazione sanguigna. Queste particelle respirabili sono dette polveri fini (abbreviazione PM10).

In Svezia, Norvegia e Germania sono state condotte misurazioni dell'aria nei centri sportivi coperti dotati di erba sintetica prodotta con granulato di pneumatici usati. Pur non essendo unitari, i risultati di queste misurazioni possono essere riassunti come segue:

- L'aria dei centri sportivi contiene polveri fini, il cui tenore non supera tuttavia il valore limite (50 microgrammi di polveri fini per metro cubo di aria esterna), ad eccezione di un centro, che non era stato arieggiato in modo adeguato.
- La metà al massimo delle polveri fini deriva dall'abrasione del granulato di gomma. Ma sono state rilevate anche particelle metalliche, tessili o silicatiche provenienti dalla sabbia di quarzo.
- La concentrazione di IPA in diversi centri sportivi norvegesi è paragonabile a quella dell'aria di Oslo durante la stagione estiva. Per la concentrazione di benzo(a)pirene (BaP) nell'aria, la Germania dispone di un valore operativo di 1,3 nanogrammi (un miliardesimo di grammo) al metro cubo. La concentrazione di BaP misurata nell'aria dei centri sportivi è inferiore a questo parametro, ed è anche inferiore di oltre 2000 volte al valore di riferimento applicabile in Svizzera sul posto di lavoro (2000 nanogrammi al metro cubo).
- Le autorità norvegesi hanno calcolato diversi scenari, nei quali giocatori di ogni età, professionisti e dilettanti, sono esposti agli IPA presenti nell'aria dei centri sportivi coperti. Nel peggiore dei casi, la quantità di IPA inalati può raggiungere i 3,8 nanogrammi per chilogrammo di peso corporeo al giorno.

I giocatori possono assorbire le sostanze nocive anche attraverso il contatto diretto della pelle con il granulato, per esempio in seguito a cadute. Pur risultando inferiore al valore operativo applicabile in Germania per gli oggetti che entrano in contatto con la pelle per meno di 30 secondi, la concentrazione di IPA nel granulato di gomma supera il valore operativo valido per gli oggetti per i quali è previsto un contatto prolungato (p. es. impugnature di attrezzi). Per il momento non è stato chiarito se questi valori siano applicabili anche ai giocatori. Si suppone inoltre che le escoriazioni facilitino l'assorbimento degli IPA attraverso la pelle.

Anche in questo caso, le autorità norvegesi hanno calcolato, con l'ausilio di diversi scenari, il volume di IPA che potrebbe essere assorbito dalla pelle, giungendo alla conclusione che nella peggiore delle ipotesi i valori possono raggiungere i 2,8 nanogrammi per chilogrammo di peso corporeo al giorno.

Dagli studi menzionati emerge che il carico di polveri fini o di IPA in un campo sintetico coperto prodotto con granulato di pneumatici usati è paragonabile a quello assorbito per strada in città. Nei prati sintetici all'aria aperta il carico può essere inferiore.

Se il granulato è prodotto con gomma nuova, con un tenore di IPA più basso, il carico di IPA diminuisce di conseguenza. Non diminuisce invece di molto la percentuale di polveri fini, poiché l'abrasione si produce anche nel granulato di gomme nuove e queste polveri provengono da fonti diverse.

Per la popolazione in generale, l'assorbimento giornaliero di BaP stimato dall'OMS e da altri enti specializzati ammonta al massimo a 5-6 nanogrammi BaP per chilogrammo di peso corporeo, che corrisponde a un tenore di IPA di circa 50-60 nanogrammi IPA per chilogrammo di peso corporeo al giorno. L'assorbimento di 6,6 nanogrammi di IPA per chilogrammo di peso corporeo al giorno calcolato per i giocatori, in scenari piuttosto prudenti (3,8 attraverso la respirazione + 2,8 attraverso la pelle), contribuisce quindi solo in misura limitata al carico totale.

Le ricerche disponibili permettono di concludere che le polveri fini o gli IPA sprigionati dall'erba sintetica prodotta con granulato di pneumatici usati non costituiscono particolari rischi per la salute.

L'erba sintetica può però avere conseguenze sul piano ecologico. Infatti, l'acqua usata per raffreddarla quando le temperature sono elevate potrebbe dilavare le sostanze nocive e farle confluire nel terreno.

Per quanto attiene invece i **metalli pesanti**, in particolare cadmio, mercurio e piombo, sono quelli maggiormente tossici per l'uomo. Questi elementi si accumulano nell'organismo determinando effetti nocivi a breve e lungo termine, diversi a seconda del metallo. Possono causare danni ai reni, al sistema nervoso e al sistema immunitario, e in certi casi avere effetti cancerogeni. I sintomi più classici di intossicazione da metalli pesanti sono l'irritabilità ed instabilità dell'umore, depressione, cefalee, tremori, perdita di memoria, ridotte capacità visive. I soggetti maggiormente a rischio sono coloro che nella dieta privilegiano pesce e selvaggina, perché questi alimenti tendono ad accumulare quantità maggiori di contaminanti metallici rispetto alla quantità presente nell'ambiente circostante.

Il termine metallo pesante si riferisce a tutti gli elementi chimici metallici che hanno una densità relativamente alta e sono tossici in basse concentrazioni. Esempi di metalli pesanti includono il mercurio (Hg), il cadmio (Cd), l'arsenico (As), il cromo (Cr), il tallio (Tl) ed il piombo (Pb).

Come elementi in tracce, alcuni metalli pesanti (per esempio rame, selenio, zinco) sono essenziali per mantenere il metabolismo del corpo umano. Tuttavia, a concentrazioni più alte possono portare ad avvelenamento. Esso potrebbe derivare, per esempio, da contaminazione dell'acqua potabile (per esempio da tubature in piombo), da alte concentrazioni nell'aria ambiente vicino alle fonti di emissione, o assunzione tramite il ciclo alimentare. I metalli pesanti sono pericolosi perché tendono a bioaccumularsi. Bioaccumulazione significa un aumento nella concentrazione di

un prodotto chimico in un organismo biologico col tempo, confrontata alla concentrazione del prodotto chimico nell'ambiente. I residui si accumulano negli esseri viventi ogni volta che sono assimilati ed immagazzinati più velocemente di quanto sono scomposti (metabolizzati) o espulsi. I metalli pesanti possono entrare nei rifornimenti idrici da scarti derivanti da consumi o industrie, o persino per effetto della pioggia acida che penetra nei terreni e porta i metalli pesanti nei corsi d'acqua, nei laghi, nei fiumi e nell'acqua freatica. A tal fine la LND ha stabilito i limiti massimi di concentrazione di metalli pesanti all'interno di granuli di gomma derivanti da PFU (Tab. 4.4).

Analiti	Limiti (mg/kg ss)
Antimonio	10
Aersenico	20
Cadmio	2
Cobalto	20
Cromo totale	150
Mercurio	1
Nichel	120
Piombo	100
Rame	120
Vanadio	90
Zinco	150
Cianuri (liberi)	1
Fluoruri	100
Benzene	0,1

Tab. 4.4 – Concentrazione massime in granuli derivanti da PFU (estratto regolamento LND)

4.3.3. Stato della ricerca sui traumi nei campi sintetici

La decisione adottata dalla LND di consentire lo svolgimento delle gare ufficiali anche su campi in erba sintetica ha come conseguenza che, accanto ai 139 campi di calcio già realizzati, se ne affiancheranno altri 109 in fase di realizzazione. Se è vero che l'erba sintetica è stata abbondantemente studiata in termini tecnici di resistenza del manto erboso (durata negli anni) e costi di gestione e manutenzione, non altrettanto si può dire relativamente alla traumatologia ad essa correlata. Infatti, in letteratura è difficile reperire studi in cui i traumi rilevati nel calcio giocato su superficie sintetica vengono messi in confronto con quelli che accadono quando la

superficie di gioco è l'erba naturale. Molto più abbondante è la letteratura relativa al football americano, dal momento che in tale disciplina i terreni in erba sintetica sono utilizzati da ormai più di venti anni.

Già nel 1989 Zemper sosteneva che il 20% delle lesioni agonistiche (lesioni muscolari, tendiniti, fratture da stress) nel football americano erano ricollegabili ai terreni da gioco sintetici su cui si svolgono gli allenamenti e le partite.

Il meccanismo scatenante eziopatogenetico è stato descritto da Kibler nel 1992 come una “cascade to overload injuries”, ovvero “una cascata di lesioni da sovraccarico”. Questa “cascata” conduce ad uno stato di fatica e di indolenzimento muscolare che si esprime ulteriormente con un decremento dei livelli di forza da tre a cinque volte i valori di base. Lo stress ciclico e ripetitivo sul tessuto connettivo indebolisce col tempo le strutture muscolo-tendineo-scheletriche e determina una minore abilità, sia nel recupero che nella capacità di “assorbimento di nuovi stimoli meccanici”.

Al contrario, altri hanno evidenziato come ovviamente le superfici sintetiche usurate perdono gradualmente le proprietà strutturali, in primis la capacità di assorbimento (“shock absorption”), predisponendo, di fatto, l'atleta ad ulteriori e crescenti rischi di patologie traumatiche da sport. Un sostanziale e significativo decremento dei rischi di lesione si evince oggi dalla letteratura col passaggio dalla prima all'ultima generazione del “Football turf”, così definito da Fifa e Uefa in luogo della terminologia più classica ma generica di “artificiale o sintetico di terza o ultima generazione”. Queste superfici, migliorando la “shock absorption”, hanno realmente fatto diminuire le patologie da usura ad esse collegate.

In una prima analisi retrospettiva, tuttavia, possiamo evidenziare che già nel 1975, in Svezia, nei risultati di uno studio sulle superfici artificiali Renström riportava un incremento delle lesioni rispetto ai terreni da gioco naturali. L'autore rilevò trenta lesioni ogni mille ore di gara su tappeto erboso artificiale, di fronte a venti lesioni ogni mille ore sull'erba. Questa prima statistica, comunque, forniva risultati non significativi a causa della ristrettezza del campione in analisi. Risultati analoghi sono stati tuttavia riportati da Hort negli anni Settanta: maggiori patologie da usura delle superfici sono state riscontrate quando allenamenti e gare erano praticati su tappeto erboso artificiale, in rapporto ai terreni naturali.

Successivamente, nel 1991, anche Árnason riscontrava nel calcio d'élite islandese gli stessi valori riportati precedentemente da altri autori: fu registrata un'incidenza significativamente più alta di lesioni su tappeto erboso artificiale rispetto a terreni naturali in erba (25 vs 10 lesioni per mille ore di monitoraggio, $p < 0,01$). Alla luce di questi riscontri, dopo l'esperienza negativa dell'incremento dell'incidenza di infortuni causato dai tappeti sintetici di prima generazione, si è

arrivati a produrre terreni da gioco artificiali aventi caratteristiche tecniche simili ai terreni naturali.

Di certo la prima necessità di adattamento da parte dei calciatori è stata relativa “al controllo della palla, che potrebbe portare a situazioni svantaggiose di gestione dopo un rimbalzo e durante una fase di rotolamento rispetto ai terreni in erba naturale”.

La positiva esperienza preliminare nei tornei giovanili ha incoraggiò Fifa e Uefa a consentire che le partite internazionali fossero giocate su queste superfici. Ekstrand ha raffrontato allora immediatamente i rischi di lesione su di un tappeto sintetico di ultima generazione (“football turf”) con quelli su campi in erba naturale. L’acquisizione dei dati è stata eseguita in conformità agli accordi internazionali sui protocolli degli studi epidemiologici sulle lesioni nel giuoco del calcio raccomandati da Fifa e Uefa. Nello studio sono state coinvolte dodici squadre europee di calcio che nel 2003-2004 avevano installato la terza generazione di superfici erbose artificiali. Nove club della Premier League, che giocavano su erba naturale, hanno funzionato da gruppo di controllo. Alla fine, in termini di risultati, si sono riscontrate le seguenti differenze nell’incidenza delle lesioni, durante gli allenamenti e le partite, tra le superfici erbose artificiali e quelle naturali:

- 2,42 vs 2,94 lesioni ogni mille ore di allenamento;
- 19,60 vs 21,48 lesioni ogni mille ore di gare.

Si è evidenziato, invece, un incremento delle distorsioni tibio-tarsiche nelle gare su tappeto artificiale rispetto ai terreni in erba naturale: 4,83 vs 2,66 lesioni ogni mille ore di gare.

Possiamo affermare che il risultato di questo studio sull’incidenza delle lesioni durante allenamenti e gare è comparabile con le scoperte di altri studi su squadre di calcio europee. Il rischio relativo ad allenamenti e gare su tappeto erboso artificiale, comparato con l’erba naturale, era maggiore da novembre a febbraio, probabilmente a causa del clima e della condizione del manto erboso, rispetto agli altri mesi della stagione sportiva. La percentuale delle lesioni traumatiche durante le gare era inoltre maggiore, durante questi mesi, su entrambi i terreni, sia naturale che artificiale.

È utile ricordare che l’unica differenza sostanziale significativa, in questo studio, consisteva in un rischio più alto di distorsione della caviglia durante le gare su tappeto erboso artificiale, a fronte tuttavia di un minore rischio di lesioni muscolari all’arto inferiore.

Un recente studio di Meyers e coll (2004) ha posto in confronto i traumi rilevati in un periodo di osservazione di cinque anni in giocatori di football di high school che giocavano su erba naturale e erba sintetica. Da tale studio si evince che sebbene esistono delle similitudini tra i traumi rilevati, ciascun tipo di superficie presenta specificità per il meccanismo traumatico, la sede del trauma e i tessuti interessati dal trauma. Una maggiore incidenza per traumi minori, interessanti la

cute e i muscoli avvengono su superficie sintetica (TurfField). Su erba naturale sono risultati essere più frequenti i traumi alle strutture ligamentose articolari (fra queste anche la rottura del Legamento Crociato Anteriore).

Negli ultimi due anni sono stati pubblicati su importanti riviste internazionali alcuni lavori sui terreni sintetici artificiali creati per il calcio. Tutti questi interventi non hanno evidenziato sostanziali differenze nell'incidenza delle lesioni tra terreni artificiali e terreni naturali. Il primo lavoro, di Fuller, ha evidenziato che non c'erano differenze notevoli tra l'incidenza, la gravità, la natura e/o la causa delle lesioni subite nel corso di allenamenti sostenuti su tappeto erboso artificiale di terza generazione o su erba naturale, sia dagli uomini che dalle donne (Grafico 4.1). Lo studio degli American College e University Football Teams (stagione 2005: 52 squadre maschili, 64 squadre femminili; stagione 2006: 54 squadre maschili, 72 squadre femminili) ha evidenziato che la maggior parte delle lesioni, muscolari ed articolari, durante gli allenamenti su entrambi i tipi di superficie, erano:

- uomini: lesioni acute su tappeto erboso artificiale: 2,92 / su erba naturale: 2,63 / $p = 0,24$;
- donne: lesioni acute su tappeto erboso artificiale: 1,94 / su erba naturale 2,23 / $p = 0,21$.

Quelle da contatto fra giocatore e giocatore:

- uomini: su tappeto erboso artificiale 1,08 / su manto di erba naturale 0,85 / $p = 0,10$;
- donne: su tappeto erboso artificiale 0,47 / su manto di erba naturale 0,56 / $p = 0,45$.

L'incidenza complessiva delle lesioni durante gli allenamenti era la seguente:

- uomini: 3,34 lesioni ogni 1000 ore di allenamento su tappeto erboso artificiale / 3,01 sull'erba;
- donne: 2,60 lesioni ogni 1000 ore di allenamento su tappeto erboso artificiale / 2,79 sull'erba.

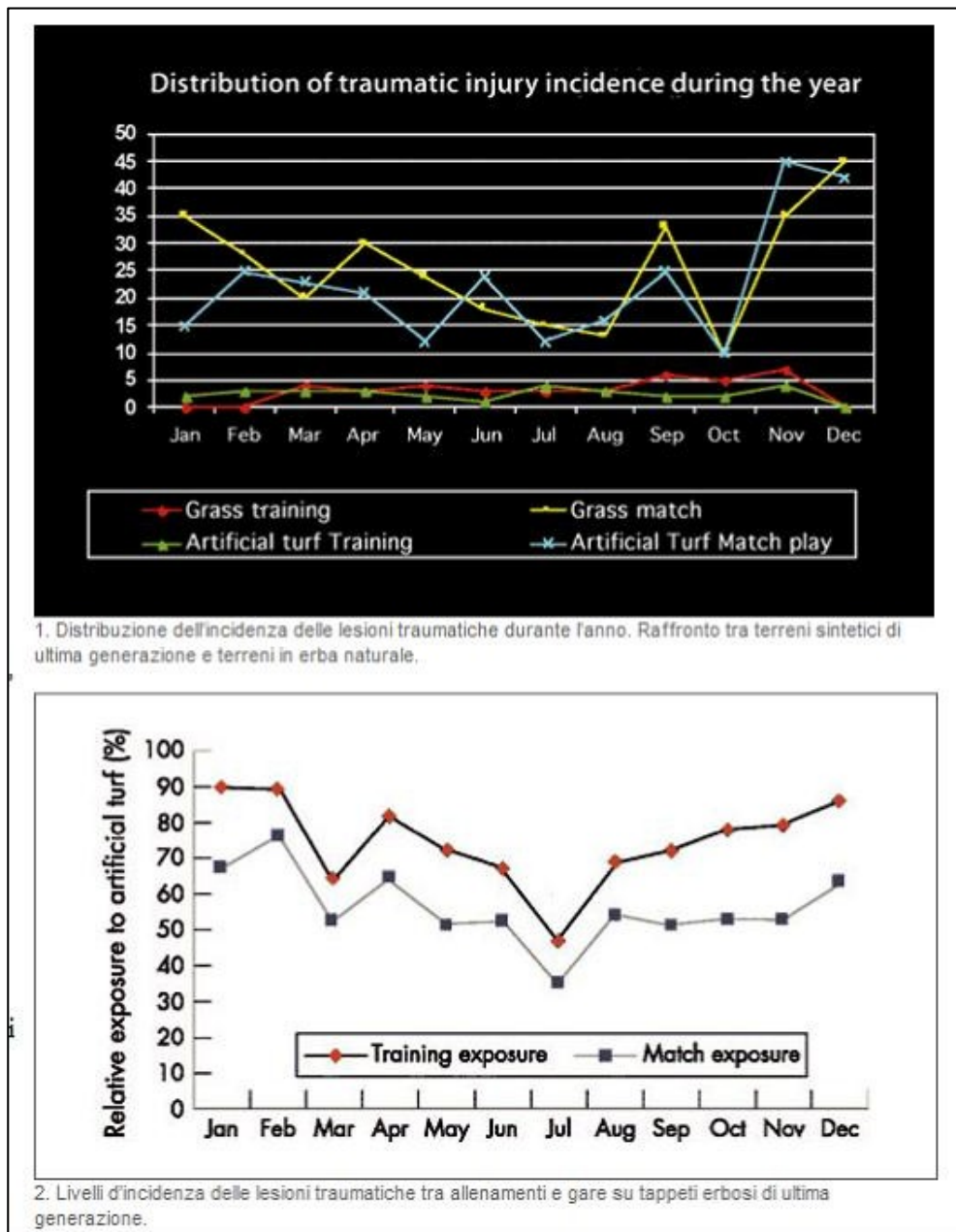


Grafico 4.1 – Confronto lesioni traumatiche su campi in erba sintetica e terreni naturali.

Un lavoro di Andersen pubblicato nel 2007 ha studiato, nella stagione sportiva 2005, circa duemila soggetti di 109 squadre. L'incidenza di lesioni acute su tappeto erboso artificiale e naturale non ha evidenziato differenze significative per quanto concerne gli eventi traumatici registrati durante la gara (rapporto di percentuale 1,0, 95%; CI 0,8 – 1,3; $p = 0,72$) o durante gli allenamenti (rapporto di percentuale 1,0, 95%; CI 0,6 – 1,5; $p = 0,93$). Nelle partite, l'incidenza di traumi gravi era significativamente più alta su tappeto erboso artificiale. Le distorsioni tibio-tarsiche erano il tipo più comune di evento traumatico (34% di tutte le lesioni acute). È stato possibile riscontrare una tendenza più accentuata a traumi alla caviglia su tappeto erboso artificiale che sull'erba (rapporto percentuale 1,5, 95%; CI 1,0 – 2,2; $p = 0,06$). L'autore ha in sostanza evidenziato quanto espresso già in altri lavori presenti in letteratura : il rischio

complessivo di lesioni acute era analogo fra tappeto erboso artificiale e naturale. Infine, la recente pubblicazione del 2008 di Andersson ha evidenziato, mediante un questionario, come i giocatori di calcio svedesi avvertano un senso di “maggior sforzo fisico” su terreno artificiale rispetto al terreno naturale. È stato registrato, tra l’altro, un decremento dei tackle scivolati su terreno artificiale rispetto alle superfici naturali.

Gli studi di questi ultimi anni hanno evidenziato come il livello dei fattori di rischio di lesioni da usura, presenti in passato, sia oggi, analogamente, in linea con l’incidenza complessiva delle patologie da usura delle superfici e questo trova riscontri in recenti studi omogenei effettuati sul calcio europeo. Si è evidenziato, però, un non trascurabile incremento dei rischi di distorsione della caviglia in giocatori maschi su tappeto erboso artificiale.

È importante, in attesa di altri studi, rapportarsi a strategie valutative di screening atte a far decrescere il livello generale degli infortuni negli atleti.

Occorre però precisare che anche volendo applicare le conoscenze del football al calcio (soccer), bisogna effettuare alcuni importanti distinguo che sono rappresentati dalla diversa natura del gioco delle due discipline (sport di contatto il primo e di non contatto il calcio) e della stessa evoluzione tecnologica non solo dei tappeti sintetici ma anche degli scarpini adottati. È opportuno inoltre tenere anche in debita considerazione che i traumi stessi hanno origine multifattoriale e di ciò andremo a discutere di seguito nella trattazione. Il poter effettuare una partita di calcio richiede sedute di allenamento che prevedono accanto alla tecnica individuale anche situazioni di tattica, inseriti in contesti atletici in cui la corsa è il principale componente. Le distanze percorse, durante una partita di calcio, superano in genere i 12 Km.(Bangsbo 1994). Queste distanze sono coperte da alternarsi di fasi di cammino, di jogging e di sprint e a livello professionistico si possono contare circa 6000 contatti del piede col suolo.(Lafortune et al 1997) Nella stessa partita il calciatore effettua accelerazioni, decelerazioni, cambi di direzione e balzi (Sproviero et al, 2002). Attraverso il contatto del piede al suolo è l’arto inferiore a supportare i maggiori carichi. Soprattutto i cambi rapidi di direzione e i takles ad alto impatto possono costituire i momenti traumatici più rilevanti. Occorre però ricordare che anche le forze scambiate dal piede al suolo, o se vogliamo attraverso lo scarpino al suolo, possono essere causa di traumi sia di tipo diretto che di tipo indiretto. Il terreno di gioco, oltre alle proprie caratteristiche intrinseche, può presentare delle variabilità determinate dalle condizioni climatiche. La scelta dello scarpino più adatto è fondamentale al fine di ridurre i traumi (Sproviero et al .2001; Sproviero E. 2001). Con riferimento specifico ai terreni in erba sintetica, si può rilevare che le diverse case produttrici ne realizzano differenti tipi che possono presentare una tessitura molto simile all’erba naturale o essere composti da materiali abbastanza sottili e simili ai tappeti di uso comune domestico

(tipicamente il fondo adottato per i campi da calcio a 5). In ogni caso l'erba sintetica presenta una capacità ammortizzante inferiore rispetto all'erba naturale e la scarpa ideale da adottare (cross training o sneakers) non risulta invece adatta per le necessità del calcio, soprattutto per calciare il pallone. Giocare su superficie sintetica può risultare particolarmente traumatico per chi non avesse scelto la calzatura più adeguata ma soprattutto per chi non avesse familiarità a giocare su tale tipo di superficie. Al fine di rendere più stabili le articolazioni, è pratica comune, nel football americano, ricorrere a metodiche di taping, sia a livello delle dita dei piedi (ove la patologia più frequente è il turf-toe, appunto dito da tappeti erbosi) sia a livello della caviglia. Altra pratica comune è quella di effettuare un taping della scarpa (a livello delle articolazioni metatarsofalangee) o utilizzare scarpini a suola più rigida. Ma proprio per le caratteristiche intrinseche del calcio, questi ultimi accorgimenti non possono utilmente essere adottati.

Sebbene questi risultati non possono avere analogo valore per i calciatori, è possibile comunque effettuare alcune considerazioni. Innanzitutto è documentato che gli scarpini adottati per l'erba naturale, proprio perché dotati di tacchetti generano a contatto con l'erba un maggior attrito in frizione e maggiori resistenze torsionali. Inoltre è documentato che l'erba naturale determina momenti di picco più elevati rispetto all'erba sintetica quando sono calzate scarpe con tacchetti (Cawley P.W., 2003). Anche questi risultati vanno interpretati in senso critico, dal momento che gli scarpini da calcio sono notevolmente differenti da quelli da football e dal momento che spesso gli stadi da football sono al coperto e quindi non risentono delle variazioni climatiche e atmosferiche che invece giocano un ruolo rilevante dal punto di vista biomeccanico all'interfaccia scarpa-superficie di gioco. Infatti calzare scarpe in condizioni climatiche diverse rispetto a quelle per le quali gli scarpini sono stati progettati e realizzati, può essere causa di seri infortuni alle articolazioni di caviglia e ginocchio. Pertanto non si può addebitare il trauma esclusivamente al terreno di gioco e alla sua superficie, quando è ormai dimostrato anche l'importante ruolo dell'interfaccia scarpa/suolo. Di conseguenza non si può concludere in maniera esaustiva dicendo che per il calcio una superficie può essere maggiormente chiamata in causa nelle eziologie dei traumi. Sono senz'altro necessari ulteriori studi, specificamente applicati al gioco del calcio. Tuttavia si possono evidenziare alcuni problemi irrisolti (Open problems) e meritevoli di far focalizzare l'attenzione delle ricerche dei tecnici su tali aspetti problematici.

Si è già detto che la lega che ha autorizzato l'uso dell'erba sintetica è quella dilettanti. Ma questo tipo di calciatori, proprio in virtù del loro status dilettantistico spesso si allenano non solo con materiale tecnico non sempre adeguato, ma soprattutto in orari e condizioni climatiche (le ore notturne), completamente diverse rispetto alle condizioni di gara. Inoltre spesso si allenano su superfici diverse rispetto a quelle di gara, quindi è facile immaginare le difficoltà che si

incontrano ai cambi di fondo, potendosi trovare ora tre diversi tipi di superfici di gioco (terra battuta, erba naturale e erba sintetica). È soprattutto quest'ultima che richiede una maggiore familiarizzazione, correndosi il rischio viceversa di incrementare l'incidenza de traumi (da contatto o indiretti). Si ricorda inoltre che per ogni tipo di superficie di gioco si deve scegliere la calzatura adeguata, anche in rapporto alle condizioni climatiche. Si dispone al momento solo di scarpini a tredici tacchetti fissi o a sei tacchetti intercambiabili, con tutte le varianti possibili relative ai diversi componenti delle scarpe (suola, tomaia, alloggio per tacchetti e diversi tipi di forma e materiale dei tacchetti). Non sono ancora in commercio scarpini specifici per erba sintetica e spesso ci si adatta a usare scarpini da calcio a 5. Abbiamo però già detto che la stessa erba sintetica è diversa in rapporto alla casa produttrice e che anche questa può risentire delle condizioni ambientali. Al momento sono allo studio in Olanda (PSV Eindhoven) scarpe da calcio specifiche per il tipo di erba sintetica adottato nello stadio della società calcistica. Cosa ci possiamo aspettare in futuro quando l'adozione di superficie sintetica sarà più diffusa? Essendo tale superficie più dura rispetto all'erba sintetica potrebbero incrementare le patologie da over use in età evolutiva (m. di Server-Blanke), per impatti più duri del tallone al suolo. Anche nel soggetto adulto potremmo riscontrare, in analogia al football americano, una maggiore incidenza di una patologia tipica dei tappeti erbosi, il *turf-toe* interessante la 1° articolazione metatarsofalangea (Sproviero et al, 2005). Tutto quanto previsto potrebbe comunque essere smentito se la ricerca, tenendo in considerazione quanto sopra esposto, porterà a sviluppare nuovi materiali da adottare sia per l'erba sintetica che per la realizzazione di calzature specifiche.

Ad ulteriore conferma delle prestazioni ottenute da queste superfici, i massimi organismi competenti (FIFA; UEFA FIGC-LND) hanno inserito nelle specifiche di omologazione dei campi da gioco anche le prestazioni minime garantite dai campi in erba artificiale (valutate con le stesse metodologie e strumentazione impiegate per i campi convenzionali), in tutto e per tutto paragonabili se non addirittura migliori a quelle ottenibili da superfici convenzionali. La sensazione di gioco su erba artificiale è perfetta: i campi sono progettati con caratteristiche tali da avvicinarsi ed in alcuni casi ad eguagliare quelle di un campo in erba naturale.

La pavimentazione del campo offre giocabilità assoluta, con notevoli vantaggi rispetto all'erba naturale che si traducono in: diminuzione dell'affaticamento e dei traumi muscolari; tempi prolungati di utilizzo; minori costi di manutenzione; maggiori prestazioni per uso sportivo. Approvata inizialmente dalla F.I.F.A. e dalla U.E.F.A., in Italia la Lega Nazionale Dilettanti ha elaborato un ottimo protocollo di qualità per l'omologabilità dei campi in erba di "terza generazione" per il calcio che, per ora, possono ospitare competizioni del Campionato di Lega Nazionale Dilettanti e del Settore Giovanile e Scolastico.

4.4. Realizzazione del campo da Rugby di Reggio Emilia

Al fine di dare concreta applicazione alla ricerca svolta, è stato realizzato in collaborazione con la ditta costruttrice UNIECO GREEN (Gandino – BG), un campo da Rugby in località Reggio Emilia. Tale campo in realtà è una trasformazione di un campo da Rugby in terra battuta in campo da Rugby avente manto in erba sintetica, compreso approntamento del sottofondo drenante della tipologia a drenaggio orizzontale sotto il manto. I lavori si sono ultimati nel luglio del 2009.

Il primo lavoro svolto è stato lo scavo di sbancamento; si è quindi proceduto alla preparazione del piano di posa della pavimentazione mediante scarifica meccanica, fino ad una profondità di circa 10 cm. Effettuato lo scavo si è passati alla realizzazione della sagomatura del piano d'appoggio; per preparare il piano di posa della pavimentazione si è utilizzato un macchinario a controllo laser continuo e costante per l'impostazione della pendenza a due falde, eseguite con parziale sterro e riporto del terreno e successivo livellamento del piano; anche questa fase è stata accompagnata dal trasporto alle discariche dell'eventuale materiale da risulta. Si è quindi proceduto con il riempimento del piano d'appoggio; l'esecuzione di intasamento superficiale è stato realizzato mediante materiale inerte di cava, drenante, avente granulometria pari a 0,4/1,2 cm, compreso livellamento con controllo laser secondo le quote progettuali ed idonee rullature con rullo vibrante fino a completo assestamento, con uno spessore dell'intasamento di cm 10.

La fase successiva consiste nella realizzazione del collettore drenante; questa si è ottenuta tramite la formazione di un collettore fognario perimetrale al rettangolo di gioco per la raccolta e l'allontanamento delle acque meteoriche superficiali, realizzato mediante uno scavo a sezione obbligata avente una larghezza pari a cm 50 ed una profondità variabile da cm 80 a cm 150 circa e la posa sul fondo dello scavo di un tubo perforato in PEAD a doppia parete, del diametro di mm 250/300 e successivo riempimento dello scavo con materiale drenante di cava (pietrisco) avente granulometria compresa fra 2,8-3,2 cm.

Si è quindi effettuata la posa in opera di pozzetti posizionati lungo il collettore fognario perimetrale, realizzati mediante elementi prefabbricati in calcestruzzo da 40 cm x 40 cm, profondità variabile da cm 50 a cm 150 circa, compreso scavo, calcestruzzo di rinfiacco, collegamento alle tubazioni fognarie e sovrastante botola prefabbricata in calcestruzzo a caditoia.

Ultimo passaggio di questa fase è la posa del recapito finale, raccordato agli altri pozzetti e alla rete drenante, realizzato con pozzetto 100 cm x 100 cm, profondità variabile sifonato e diaframmato, per ispezione e raccordo alla rete fognaria.

Realizzato il collettore drenante si è passati alla formazione della cordonatura di contenimento eseguita sui lati corti del campo per destinazione, ed eseguita con moduli in elementi prefabbricati

di calcestruzzo, compreso lo scavo in sezione, previa la preparazione del piano di posa, il letto ed il rinfiacco di calcestruzzo, dosato a kg 200 di cemento per mc.

Fatto ciò si è passati all'impermeabilizzazione del piano sagomato; si è quindi posata sull'intera superficie la guaina impermeabilizzante LD-PE termosaldata, come strato separatore fra strato di riempimento e materassino drenante. La guaina in polietilene da 1 mm garantisce una perfetta impermeabilizzazione dell'intera superficie, grazie alla alta densità della sua struttura consente un'elevata impermeabilizzazione (Foto 4.2). Sopra alla guaina si è poi posato il telo geocomposito per drenaggio planare ottenuto da accoppiamento per termosaldatura continua di anima drenante in monofilamenti estrusi (GMA) a due strati in geotessile (GTX) per separazione e filtrazione (Foto 4.3). Testati e approvati dalla F.I.G.C.-L.N.D. come sistemi drenanti da calcio realizzati con manti in erba sintetica.



Foto 4.2 - Particolare guaina impermeabile e canaletta di scolo.

Realizzate tutte queste operazioni preliminari si è finalmente arrivati alla posa del manto in erba Artificiale VG 720 Mono Top F.I.R, monofilamento di ultima generazione in polietilene di colore verde, resistente agli U.V 11.500 dtex, spessore 120 micron, tessitura tufted con 12800 punti al mq, altezza filato ben 70 mm più 2 mm di supporto, ancorato su primario spalmato sul lato inferiore con lattice speciale resistente all'acqua, imputrescibile, drenante (Foto 4.4). La posa è stata effettuata mediante stesura dei teli e incollaggio degli stessi su apposita banda geotessile stabilizzata, con l'impiego di colla poliuretanic bicomponente per esterni, con inserimento della rigatura bianca di cm 10 compresa ogni altra finitura.



Foto 4.3 - Fase di posa dei rotoli di geodreno



Foto 4.4 - Fase di posa dei rotoli di erba sintetica

L'intaso è stato invece eseguito con sabbia quarzifera in ragione di 20 kg/m^2 e gomma del tipo SBR Verde nobilitato in quantità di 20 kg/m^2 , omologata secondo l'ultimo regolamento della L.N.D. (Foto 4.6). Il granulo intasante è conforme a tutti i requisiti della norma DIN 18035-7 ed inoltre non contiene ammine aromatiche e non rilascia composti aromatici policondensati (IPA).

Ultimo lavoro, per completare il campo da rugby in erba sintetica (Foto 4.6), è stato quello di predisporre l'impianto d'irrigazione automatico a scomparsa così costituito:

- N° 1 programmatore modulare ESP-MS;
- N° 6 irrigatori dinamici a scomparsa con coperchio in erba sintetica modello SPORT GUN

altezza massima 7,00 mt lunghezza di gittata 37 mt;

- N° 6 elettrovalvole in resina modello 600-PGA complete di saracinesca di intercettazione e bocchettone in PVC;
- N° 6 pozzetti in resina rettangolari per alloggiamenti elettrovalvole;
- Cavo elettrico doppio isolamento FG7-OR 1x1,5 1000 mt;
- Scavo e fornitura di tubo corrugato in PE AE 63 mm passacavo 400 mt;
- Tubo PE 100 PN 10 AE 90 400 mt;
- Raccordi e minuteria necessaria.



Foto 4.5 - Particolare sull'intasamento a lavori finiti



Foto 4.6 - Campo alla fine dei lavori, vista dalla tribuna

4.5. Conclusioni

Il continuo sviluppo della ricerca, anche in ambito sportivo, ha permesso di testare la validità del recupero del PFU per la realizzazione di campi sportivi in erba sintetica. In particolare, l'opportunità di utilizzare materiali alternativi ai tradizionali materiali inerti (ghiaia e sabbia),

rappresenta un importante e necessario passo considerato che i materiali inerti naturali saranno sempre meno disponibili alla luce delle recenti restrizioni e divieti sulle attività di scavo nelle cave e negli alvei fluviali. Inoltre, poter utilizzare il PFU in tale campo, rappresenta un importante mercato in continuo sviluppo visto che ogni anno vengono realizzati nuovi campi sportivi in erba sintetica. La ricerca svolta ha quindi permesso di verificare, attraverso le numerose prove di laboratorio effettuate sui materiali da intaso e previste dalla Lega Nazionale Dilettanti (LND) che, l'utilizzo di granuli derivanti da PFU, rispettano i valori limiti previsti dalla normativa. Anche la realizzazione di un nuovo campo da rugby in località Reggio Emilia, ha contribuito a valorizzare e recuperare materiale derivante da PFU, sottraendolo così allo smaltimento in discarica, tra l'altro vietato per legge con l'entrata in vigore del D.lgs 36/2003.

5. UTILIZZO DEL PFU PER GLI ASFALTI MODIFICATI

5.1. Bitumi tradizionali e i bitumi modificati

5.1.1. Origine del bitume

Con il termine bitume si indica il residuo della distillazione sottovuoto del petrolio, costituito da una miscela complessa di idrocarburi ad elevato peso molecolare. I rapporti percentuali fra i componenti variano notevolmente a seconda del petrolio grezzo di provenienza e del metodo di distillazione e lavorazione dal quale sono ottenuti.

In realtà il bitume era già noto molto tempo prima dell'inizio dello sfruttamento dei giacimenti petroliferi, essendo anche un prodotto di origine naturale, denominato in questo caso "bitume asphaltico nativo". Era utilizzato dai Romani come legante in edilizia (il termine bitumen è di origine latina) e ancor prima era noto ai Sumeri e al popolo Egiziano, che lo impiegava nelle pratiche di mummificazione .

Depositi di bitume nativo sono presenti in tutto il mondo, in zone con caratteristiche geologiche adeguate, nelle quali l'alta permeabilità delle formazioni rocciose ha permesso un processo di frazionamento naturale del petrolio greggio.

Il bitume naturale è un prodotto non più utilizzato nell'industria: i processi di raffinazione del petrolio producono attualmente bitumi di qualità soddisfacente a tutti gli usi per i quali è destinato, dall'impermeabilizzazione alla pavimentazione stradale. Il prodotto ottenuto dalla distillazione può essere utilizzato tal quale oppure sottoposto a processi chimici e fisici che ne variano opportunamente la composizione, al fine di conferirgli determinate proprietà. Le operazioni più comuni sono l'estrazione con solvente, i processi di ossidazione e la miscelazione con bitumi di diversa composizione.

5.1.2. Composizione chimica

La composizione elementare del petrolio di partenza, seppur varia, è generalmente compresa nei limiti riportati in Tab. 5.1. L'analisi elementare non fornisce molti elementi per determinare la resa in bitume di un petrolio. Per ottenere queste informazioni occorre un'analisi qualitativa e quantitativa dei composti organici presenti. Il grezzo, dato il processo millenario attraverso il quale si è formato, non contiene generalmente composti insaturi, ma è composto da idrocarburi alifatici, ciclo alcani (C5-C7), nafteni, composti aromatici e poliaromatici (asfaltini).

Elemento	% in peso
Carbonio	81-87
Idrogeno	10-14
Zolfo	0.06-8
Ossigeno	0-2
Azoto	0.02-1.7

Tab. 5.1 - Composizione elementare del petrolio

Il grezzo, dato il processo millenario attraverso il quale si è formato, non contiene generalmente composti insaturi, ma è composto da idrocarburi alifatici, ciclo alcani (C5-C7), nafteni, composti aromatici e poliaromatici (asfalteni).

Gli ultimi tre composti sono quelli più pesanti e più stabili, che si ritrovano nel prodotto di fondo della colonna di topping (distillazione atmosferica), inviato poi alla distillazione vacuum. Di conseguenza petroli con più elevate percentuali di questi composti sono i più adatti alla produzione di bitume. Fra questi, alcuni grezzi del Sud America hanno una percentuale di composti naftenico-aromatico-asfaltici superiore al 30%; altri grezzi messicani hanno un contenuto in composti aromatico-asfaltici superiore al 35%.

Il bitume è costituito da due principali classi di composti: gli **asfalteni** ed i **malteni** (quest'ultimi detti anche petroleni).

Asfalteni

Gli asfalteni, presenti nel bitume da un 5% a un 25% in peso, sono miscele complesse di idrocarburi, costituiti principalmente da:

- 1) composti aromatici con anelli condensati e catene alchiliche aventi fino a trenta atomi di carbonio;
- 2) composti eteroaromatici contenenti zolfo (presente in anelli benzotiofenici) e azoto in anelli pirrolici o piridinici.

Sono usualmente presenti anche ammine e ammidi, composti ossigenati (chetoni, fenoli o acidi carbossilici), nichel e vanadio complessati con l'azoto in sistemi porfirinici.

Il peso molecolare delle molecole asfalteniche è uno degli aspetti più controversi degli studi sui materiali bituminosi: le diverse tecniche forniscono risultati che variano anche di più ordini di grandezza, in funzione della metodologia utilizzata.

Una possibile spiegazione risiede nel fatto che quasi tutte le tecniche richiedono la diluizione del composto in appositi solventi, che in qualche modo ne alterano la morfologia, causando la

dissoluzione delle molecole più pesanti o l'aggregazione di quelle più polari in nuove strutture. Inoltre nella maggior parte dei metodi d'analisi la determinazione del peso molecolare deve essere effettuata per confronto con uno standard adeguato, non sempre facilmente individuabile.

Come valore di riferimento si può considerare un range di variabilità compreso generalmente fra 800 e 2500 U.M.A.

Un'altra questione riguarda il numero di anelli condensati, che alcuni ricercatori ritengono sia variabile tra 6 e 15; altri considerano una media di 7, ponderata su un intervallo di valori compreso tra 4 e 10; le misure sono condotte tramite microscopia elettronica a scansione (SEM), diffrazione a raggi X, NMR, assorbimento ottico.

Malteni

I malteni possono a loro volta essere suddivisi in due sottogruppi:

- *Resine*
- *Oli*

Le resine sono i composti più polari, strutturalmente molto simili agli asfalteni.

Rispetto a questi hanno un peso molecolare minore, stimato fra 500 e 1000 U.M.A., ed un rapporto carbonio alifatico/carbonio aromatico (Calif/Carom) molto più elevato a causa del maggior numero di catene paraffiniche. Alcuni scienziati presuppongono che gli asfalteni abbiano origine in natura dall'ossidazione delle resine. La frazione oleosa è costituita essenzialmente da anelli naftenici e aromatici collegati da lunghe catene alifatiche (si distinguono infatti oli saturi e aromatici), per cui il rapporto Calif/Carom è decisamente in favore delle paraffine. Gli oli sono la frazione a più basso peso molecolare, inferiore a 500 U.M.A.

5.1.3. Frazionamento del bitume e morfologia

Il maggior ostacolo alla caratterizzazione del bitume è costituito dall'alto peso molecolare dei composti, che con i metodi attualmente disponibili non permette di risalire alle singole specie presenti. Tuttavia la classificazione nelle tipologie appena menzionate è sufficiente a verificare la rispondenza del bitume a determinate specifiche industriali. Ognuna delle tre classi presenta diversa polarità e solubilità; l'analisi fisico-chimica è quindi effettuata per frazionamento con specifici solventi, sfruttando queste proprietà. Resine e asfalteni costituiscono le frazioni più polari, ma sono contraddistinte da una differente solubilità: gli asfalteni sono insolubili nelle paraffine a basso peso molecolare (C5-C7), quindi generalmente la prima fase del frazionamento consiste nella separazione della frazione asfaltenica con n-eptano o n-pentano. La parte maltenica viene successivamente frazionata mediante cromatografia e diluizione con solventi a polarità crescente. In Fig. 5.1 si riporta uno schema tipico di frazionamento del bitume.

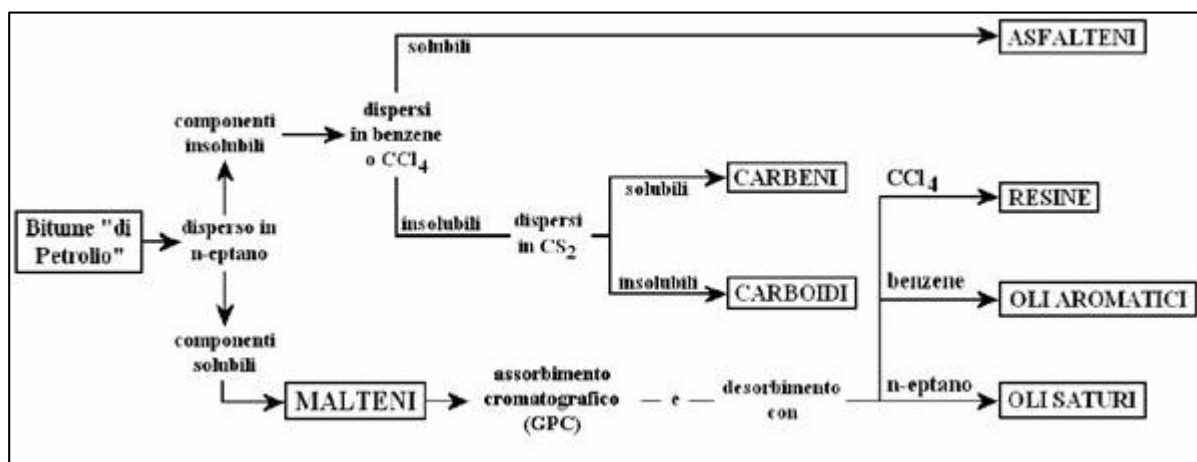


Fig. 5.1 - Schema di frazionamento del bitume

Si nota che sono presenti altri due tipi di composti che non sono stati elencati fra i costituenti: i carbeni ed i carboidi.

Questi composti non sono solitamente presenti nel prodotto della distillazione e si formano in eventuali trattamenti termici del bitume. Per definizione infatti il bitume è completamente solubile in solfuro di carbonio, che viene invece utilizzato per separare questi due prodotti. L'efficacia dell'identificazione dipende molto dal tipo di solvente utilizzato. Sono state effettuate molte ricerche sulla solubilità degli asfalteni, che appare essere molto più correlata al carattere di aromaticità e polarità che non alle dimensioni delle molecole. Alcuni studi hanno verificato che la precipitazione con acetone, che implica un incremento del carattere polare del mezzo di solvatazione, ha un grande effetto sulla distribuzione delle molecole asfalteniche secondo la loro solubilità, generando notevoli differenze nel peso molecolare medio e nella polidispersità; questo studio conferma quanto sia importante il mezzo solvente anche per la determinazione della struttura. Altri ricercatori hanno studiato la solubilità in miscele n-eptano/toluene a diverse temperature tramite spettroscopia PCS, che ha fornito anche un diametro delle particelle asfalteniche collocabile fra 125 e 400 nm. E' stato verificato che questi valori dipendono in parte dalla concentrazione iniziale di asfalteni nel bitume.

Per quanto attiene la morfologia, si può dire che non è stata ancora raggiunta una totale concordanza di opinioni sull'effettiva struttura del bitume. Una teoria comunemente accettata riconduce gli asfalteni a un sistema micellare (colloidale) stabilizzato dalle resine adsorbite e mantenute in soluzione dalla frazione aromatica. Asfalteni, resine e oli possono combinarsi in strutture più o meno stabili a seconda dei rapporti in cui si trovano fra loro.

Gli oli, essendo il mezzo disperdente, devono avere un buon potere solvente nei confronti degli asfalteni e questa proprietà è legata ad un elevato grado di aromaticità. Le resine sono il fattore determinante per la stabilità del sistema, dovendo presentare caratteristiche affini sia agli oli che

agli asfalteni. Studi piuttosto recenti hanno dimostrato che le resine possiedono una notevole selettività verso differenti siti di adsorbimento degli aggregati asfaltenici, nella cui formazione sembrano giocare un ruolo importante i legami a idrogeno. In particolare l'estensione, in termini di area di contatto, della regione aromatica delle resine sembra fondamentale per l'equilibrio di questi composti.

I parametri fondamentali che devono essere verificati in un bitume (ma ancora prima nel grezzo d'origine) sono quindi:

- rapporto aromatici/saturi
- rapporto resine/asfalteni

Il decrescere di questi due rapporti provoca coalescenza e formazione di aggregati di dimensioni notevoli, che oltre a dare un bitume di cattiva qualità possono precipitare durante la raffinazione, causando ingenti danni all'impianto.

Dal punto di vista del comportamento macroscopico ognuno dei composti, in virtù delle sue caratteristiche chimiche, ricopre un ruolo diverso:

- Gli asfalteni sono i responsabili delle proprietà di consistenza, resistenza alle sollecitazioni meccaniche e adesività del bitume.
- Le resine conferiscono elasticità e duttilità (sono i "ponti" della struttura).
- Gli oli danno fluidità e sono gli artefici dello scorrimento a caldo del bitume, che è fondamentale per ricoprire efficacemente e velocemente il materiale lapideo che forma il conglomerato bituminoso per le pavimentazioni

5.2. Impiego stradale dei bitumi

5.2.1. La pavimentazione

I bitumi di petrolio sono utilizzati principalmente in campo stradale a formare i cosiddetti conglomerati bituminosi, che opportunamente stesi in strati di diverso spessore e diversa composizione costituiscono la pavimentazione (Fig. 5.2).

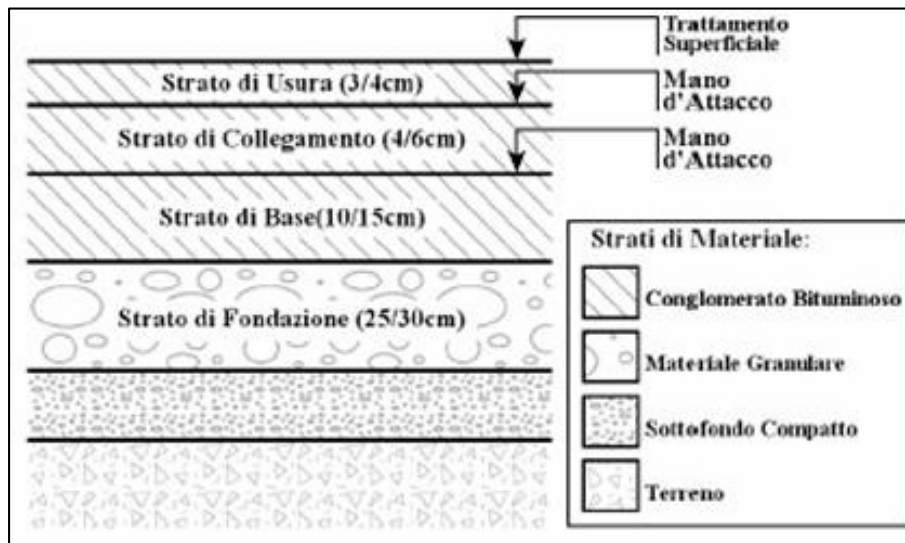


Fig. 5.2 - Pavimentazione stradale tipo

L' "ossatura" del conglomerato è il materiale lapideo, per il quale il bitume funge da legante. I vari strati sono costituiti da materiali inerti di granulometria via via più fine e più regolare man mano che ci si avvicina alla superficie; in genere fra quelli superficiali è posta una patina sottile di emulsione bituminosa che aumenta l'adesione (mani d'attacco).

Lo strato di usura può richiedere un trattamento superficiale che ne aumenta la ruvidità, per migliorare il coefficiente d'attrito con i pneumatici.

Lo stato di sollecitazione è piuttosto complesso e comprende effetti di trazione e compressione in tutte le direzioni. Lo strato superficiale è naturalmente quello più sottoposto a deterioramento, non solo a causa del traffico, ma anche delle condizioni ambientali. La radiazione solare, la pioggia, l'ossidazione atmosferica, sono tutti fenomeni che contribuiscono in maniera determinante all'usura della pavimentazione.

I problemi più frequenti di deterioramento sono:

- Deformazioni permanenti con formazione di ormaie (*rutting*)
- Rottura a fatica (*fatigue cracking*) con fessurazioni in direzione prevalentemente longitudinale. Uno stadio avanzato di questo tipo di deterioramento porta alla formazione di crepe in tutte le direzioni (*alligator cracking*) che danno luogo al distacco di pezzi di conglomerato, generando buche (*pothole*).
- Fessurazioni a basse temperature (*low temperature cracking*) in direzione trasversale alla direzione del traffico, dovute a ritiro termico.

5.2.2. Caratteristiche del legante

Il legante costituisce mediamente solo il 5% della miscela; nonostante ciò, dal bitume dipendono praticamente tutte le proprietà meccaniche di un conglomerato.

Le caratteristiche fondamentali di un buon legante sono:

- Sufficiente rigidità alle elevate temperature di esercizio, accompagnata da una non eccessiva fragilità nel periodo invernale, o nei climi particolarmente freddi. La suscettività termica di questo materiale è uno dei maggiori pregi e anche dei maggiori problemi del bitume.
- Buona adesività al minerale inerte. E' forse il fattore principale per contrastare il deterioramento: conferisce resistenza meccanica alle sollecitazioni, in quanto le caratteristiche viscoelastiche del bitume si trasmettono al conglomerato, e rende la pavimentazione impermeabile, impedendo all'umidità di penetrare. L'acqua, se presente nel conglomerato, entra in competizione con il bitume nel legarsi all'aggregato lapideo e causa ulteriore perdita di adesione.
- Facilità di miscelazione al materiale inerte. Il legante non deve presentare eccessiva viscosità alle alte temperature altrimenti ci sarà una miscelazione incompleta, con conseguenze facilmente immaginabili.

Le caratteristiche chimiche e fisiche del bitume possono variare notevolmente nel tempo, specialmente nei primi due/tre anni dalla messa in opera; dopo questo periodo l'invecchiamento del materiale procede molto più lentamente.

L'invecchiamento è dovuto ad una modifica delle caratteristiche morfologiche della struttura colloidale, che si riflette principalmente sulle proprietà del materiale alle alte temperature, con peggioramento delle proprietà meccaniche. L'entità del fenomeno dipende molto dalle modalità di preparazione del conglomerato. Nella camera di miscelazione infatti il bitume, posto su strato sottile, è esposto ad un flusso di aria calda (150-160°C) e successivamente miscelato con gli aggregati. In questo processo iniziano fenomeni di volatilizzazione e ossidazione dei componenti che continuano anche dopo la messa in opera, modificando le proprietà reologiche in maniera praticamente continua, anche se con velocità ridotta. L'entità della variazione dipende molto dalla temperatura operativa, in relazione alla composizione del bitume.

Esistono diverse prove per lo studio dell'invecchiamento a breve e lungo termine; le più diffuse sono il Thin-Film Oven Test (TFOT) e il Rolling Thin-Film Oven Test (RTFOT) per le prove a breve termine. L'invecchiamento sul lungo periodo è effettuato in pressione in un'apparecchiatura denominata PAV (Pressure aging vessel) che permette di valutare l'invecchiamento a 5-7 anni dalla messa in opera.

5.2.3. Metodi tradizionali di caratterizzazione fisica

L'analisi dinamica e la viscometria completano le informazioni fornite dai metodi tradizionali di caratterizzazione reologica dei bitumi. Tali metodi, standardizzati e riportati nella normativa CNR vigente in Italia riguardante i bitumi ad uso stradale, comprendono la valutazione di diverse proprietà:

- Penetrazione
- Temperatura di rammollimento
- Punto di rottura Fraas
- Duttilità
- Densità
- Saggio di infiammabilità

La penetrazione è la profondità alla quale un ago di dimensioni standard affonda in un bitume sotto determinate condizioni di carico, tempo e temperatura (le norme indicano rispettivamente 100g, 5 secondi e 25°C). E' una prova che serve a determinare la consistenza e la durezza di un bitume (i bitumi più duri possiedono penetrazioni più basse).

Il metodo denominato "Palla & Anello" consente di specificare la temperatura di rammollimento di un bitume, parametro importante per valutare la qualità di un prodotto in funzione della destinazione. I bitumi destinati alle mescole per pavimentazione stradale hanno una temperatura di rammollimento fra 45 e 55°C.

L'indice di penetrazione (IP) fornisce un'indicazione circa la suscettibilità di un bitume alla temperatura e si ottiene dalla combinazione dei risultati delle prove precedenti. I bitumi con un più alto punto di rammollimento possiedono un valore di IP maggiore, ovvero una minore sensibilità alla temperatura.

Il punto di rottura Fraas è una prova che serve a stabilire la fragilità a freddo di un bitume. Il test consiste nel flettere a intervalli regolari una lamina sulla quale è stato applicato uno strato di prodotto da analizzare (~0,4 g), abbassando contemporaneamente la temperatura.

La duttilità è misurata dalla lunghezza alla quale è possibile allungare il bitume prima di arrivare alla rottura.

La misura della densità, effettuata con un picnometro, è utile soprattutto per la classificazione fiscale: il bitume deve possedere una densità a 70° C pari o superiore a 0,942.

Il saggio di infiammabilità indica se un bitume è stato inquinato con prodotti leggeri, aggiunti per migliorarne la stabilità. Si determina riscaldando il bitume in condizioni standard ed osservando a quale temperatura si accendono i vapori.

5.3. I bitumi modificati (asphalt rubber)

L'utilizzo dei polimeri come modificanti delle proprietà del bitume è iniziato nei primi anni '70 e tuttora il mercato e la ricerca sono in continua evoluzione.

La modifica con percentuali variabili di polimeri permette di abbassare la suscettività termica, di migliorare la coesione dell'asfalto e modificarne in vario modo le caratteristiche reologiche, a seconda della temperatura di utilizzo, della percentuale e del tipo di polimero utilizzato. La grande maggioranza dei modificanti, circa il 75% (dato 2002), è costituita dagli elastomeri termoplastici; i più diffusi sono SBS (Stirene-Butadiene-Stirene), SIS (Stirene-Isoprene-Stirene) e SB (Stirene-Butadiene). Altri polimeri molto utilizzati sono i plastomeri (circa 15% del mercato), mentre una modesta percentuale è riservata ai polimeri reattivi.

Plastomeri ed elastomeri formano generalmente una struttura reticolata che ingloba la fase bituminosa: la rete costituita dal polimero si rigonfia ma mantiene le sue caratteristiche, che si riflettono sulle proprietà del bitume. I polimeri reattivi, fra i quali possiamo citare i RET (Reactive Ethylene Terpolymers), presentano anelli epossidici che reagiscono con gruppi funzionali presenti nelle molecole asfalteniche, creando un vero e proprio legame chimico con la matrice bituminosa. Il miglioramento delle caratteristiche del bitume può avvenire in molte direzioni: gli elastomeri sostanzialmente migliorano le proprietà di recupero elastico della base bituminosa, mentre plastomeri e polimeri reattivi ne aumentano la rigidità. In entrambi i casi il bitume acquista resistenza, che si traduce in una maggior durata delle buone condizioni del manto stradale.

5.3.1. I bitumi modificati con SBS

Gli elastomeri termoplastici SBS sono attualmente i polimeri più utilizzati nella modifica dei bitumi, grazie alla loro capacità di conferire ottima lavorabilità alle alte temperature, migliore resistenza alle sollecitazioni meccaniche ed un buon comportamento elastico. La sigla stessa indica la configurazione dell'elastomero, un copolimero a blocchi stirene-butadiene-stirene. Il peso molecolare medio è di 10000-15000 U.M.A. per il polistirene e di 50000- 70000 U.M.A. per il polibutadiene; i nuclei polistirenici rappresentano mediamente il 30% del peso del polimero. La struttura molecolare dell'SBS può essere lineare o radiale; la struttura lineare vede due blocchi di polistirene posizionati agli estremi del blocco elastomerico di polibutadiene, mentre nella struttura radiale i blocchi di polistirene, almeno tre, sono disposti in una configurazione a stella intorno al polibutadiene.

Il comportamento meccanico è dovuto proprio alla struttura bifasica del copolimero, costituita da domini di polistirene dispersi in una matrice di gomma polibutadiene. Tale configurazione è dovuta principalmente alla marcata differenza delle temperature di transizione vetrosa dei due

polimeri: il polistirene ha una temperatura di transizione vetrosa di 95°C mentre per i domini dienici è circa -80°C. Sotto la temperatura di transizione vetrosa dello stirene, quindi alle normali condizioni di esercizio di una pavimentazione stradale, i blocchi stirenici dell'unità monometrica si uniscono a formare dei nuclei uniti dalle catene polibutadieniche che danno luogo ad una conformazione a "rete". L'SBS presenta a temperatura ambiente un comportamento analogo alle gomme vulcanizzate: i segmenti polibutadienici agiscono come elastomeri mentre quelli polistirenici formano domini rigidi che operano come punti di reticolazione.

Questa struttura reticolata (diversamente dalle gomme vulcanizzate) è reversibile, quindi le proprietà fisiche e meccaniche del copolimero non variano dopo ripetuti riscaldamenti e raffreddamenti, proprietà molto importante che caratterizza anche il bitume modificato con SBS. Dal punto di vista morfologico il bitume modificato con elastomeri costituisce un sistema multifase: una fase ricca in polimero contenente una certa percentuale di malteni assorbiti dallo stesso, una fase ricca in asfaltini ed una fase costituita principalmente da malteni.

A basse concentrazioni del modificante (solitamente inferiori al 4%, ma la soglia è variabile) si osserva una fase bituminosa continua nella quale è disperso il polimero: risulta un materiale meno fragile alle basse temperature, ma le caratteristiche della miscela sono quelle della base bituminosa. Ad elevate concentrazioni del polimero (superiori al 5-7%) si forma una matrice polimerica continua nella quale il bitume funge da agente plastificante; le proprietà di questo sistema dipendono principalmente da quelle del polimero.

Se il contenuto in polimero è intermedio, intorno al 4-6%, si possono formare microstrutture nelle quali le due fasi sono continue ed interconnesse; questa dispersione è difficile da controllare perché le proprietà dipendono spesso dalla storia termica. Quando l'SBS è miscelato con la base bituminosa, la fase elastomerica del copolimero assorbe la frazione maltenica (frazione oleosa) e si rigonfia, aumentando il suo volume fino a nove volte, in funzione del tipo di base. Percentuali di polimero medio-alte, intorno al 5-7% in peso, creano una rete tridimensionale polimerica che modifica radicalmente le proprietà del bitume. Il prodotto ottenuto ha un intervallo di elastoplasticità molto più ampio, miglior comportamento ad alte e basse temperature e maggior resistenza alla fatica e all'usura dettato dall'incremento delle proprietà elastiche. Il problema derivante dalla modifica con questo copolimero è che la struttura non è termicamente stabile. La gomma termoplastica ha un peso molecolare simile a quello degli asfaltini o addirittura più alto. Gli asfaltini e il polimero competono per il potere solvente della fase maltenica e se la quantità di malteni è insufficiente si può creare una separazione di fase; questa separazione è un indice della incompatibilità della base bituminosa con la fase polimerica. L'efficacia della modifica e la

stabilità durante il trasporto, lo stoccaggio e la messa in opera del prodotto si basano sull'ottimizzazione di molti parametri:

- Composizione e quantità del modificante;
- Composizione del bitume;
- Profilo termico del processo di miscelamento;
- Entità dello sforzo di taglio nella miscelazione e adeguato tempo di contatto.

E' possibile inoltre migliorare la compatibilità addizionando il bitume con oli aromatici, tenendo conto che una percentuale troppo alta dissolve i blocchi polistirenici annullando i benefici dell'aggiunta del copolimero. In ogni caso le caratteristiche della base sono determinanti per la struttura finale del prodotto. A titolo d'esempio sono riportate in Foto 5.1 le fotografie effettuate con il microscopio a fluorescenza di alcuni bitumi modificati con SBS, dove varia la base bituminosa e la percentuale di polimero modificante. Il bitume di tipo A è una base paraffinica (Russia) mentre quello di tipo B è una base naftenica (Venezuela); le due basi hanno punto di rammollimento e consistenza molto simili ma differiscono profondamente per la composizione chimica (Tab. 5.2). La modifica è stata effettuata con percentuali in peso di copolimero del 5% e 7% per entrambe le basi. Dalle immagini riportate è evidente la natura complessa dell'interazione bitume polimero, fortemente dipendente dalla natura della base bituminosa e dalla percentuale di modificante.

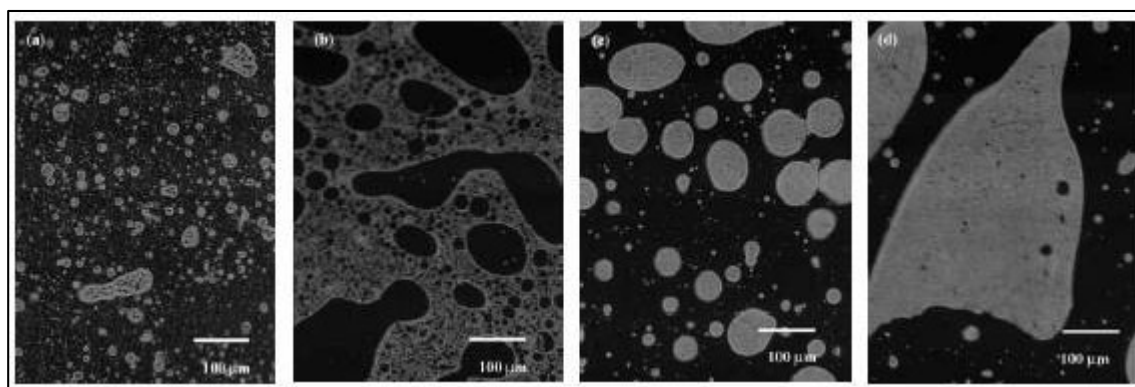


Foto 5.1 - Morfologia del bitume modificato con SBS: (a) AS5; (b) AS7; BS5; (d) BS7

In generale il bitume a base paraffinica mostra una più marcata variazione delle caratteristiche reologiche rispetto a quello naftenico a parità di polimero modificante. Tali differenze, in particolar modo il miglioramento delle proprietà elastiche, sono ancora più evidenti alle alte temperature e alle basse frequenze. Questo è dovuto al fatto che la bassa viscosità della base bituminosa paraffinica permette alle proprietà elastiche della "rete" costruita dal polimero di influenzare maggiormente le proprietà meccaniche dell'asfalto così ottenuto.

Binder	Penetration	Softening point	Saturates (%) ^a	Aromatics (%) ^a	Resins (%) ^a	Asphaltenes (%) ^a	Colloidal index ^b
Bitume A	73	47	4	68	19	9	0.149
Bitume B	81	46.8	11	58	17	14	0.333
a) Iatroscan thin film chromatography SARA analysis							
b) Colloidal index = (asphaltenes+saturates)/(resins+aromatics)							

Tab. 5.2 - Basi bituminose

I principali vantaggi derivanti dall'utilizzo dell'asfalto modificato sono:

- Performance e durabilità superiori;
- Maggior resistenza all'invecchiamento e all'ossidazione dovuta ad una maggior ricopertura degli inerti;
- Maggior resistenza all'ormaiamento grazie all'incremento della viscosità e del punto di rammollimento;
- Maggiore resistenza a fatica e alla fessurazione nel conglomerato, a causa del maggior contenuto percentuale di legante presente;
- Possibilità di applicare spessori inferiori di conglomerato, che comportano anche minori tempi di costruzione legati alla minor quantità di materiale;
- Efficacia dei trattamenti di riabilitazione con AR, che si pongono come valida alternativa alla ricostruzione;
- Vantaggio economico dovuto alla riduzione degli spessori, ad una maggior durabilità e alla minor manutenzione;
- Diminuzione del rumore (equivalente all' 80% di traffico in meno);
- Riduzione della distanza di frenata fino al 15%, anche in condizioni climatiche avverse;
- Maggior sicurezza legata alla maggior aderenza pneumatico-asfalto, alla riduzione dei fenomeni di splash and spray e acquaplaning e all'aumento della visibilità notturna, dovuta alla colorazione scura persistente nel tempo che crea contrasto fra pavimentazione e segnaletica orizzontale;
- Miglioramenti di aderenza, tessitura e regolarità superficiale (IRI);
- Riutilizzo di ingenti quantità di pneumatici fuori uso preservando nel contempo le risorse naturali;
- Aumento della ritenzione degli aggregati dovuto alla diminuzione dello spessore.

5.3.2. Comportamento reologico dei bitumi

Il bitume è un materiale caratterizzato da elevatissima sensibilità termica. Il suo comportamento reologico è assimilabile a quello di polimeri a basso peso molecolare, dei quali presenta l'andamento tipico del modulo dinamico e della cedevolezza. A temperatura ambiente e fino a circa 70°C, il comportamento è prevalentemente viscoelastico; oltre questa temperatura avviene la transizione da liquido viscoelastico a fluido, eventualmente Newtoniano. La transizione vetrosa si manifesta intorno ai -20°C; questo valore si mantiene grossomodo costante per tutti i tipi di bitume ed anche la modifica con polimeri non ne provoca grandi variazioni. La temperatura di una pavimentazione stradale esposta al sole può raggiungere temperature massime intorno ai 60-80°C e nei climi estremamente freddi la minima temperatura può scendere sino a -40°C.

Da questi dati è palese che è necessaria una caratterizzazione reologica che copra un intervallo molto ampio di temperature. La forte dipendenza delle proprietà reologiche dalla temperatura si manifesta anche nell'applicazione del metodo delle variabili ridotte, che alle alte temperature sembra non essere pienamente valido. Tuttavia alle normali condizioni di servizio le informazioni ottenute dalla costruzione della master curve forniscono un andamento realistico del comportamento del materiale al variare della frequenza e della temperatura.

Lo studio della viscosità del bitume alle alte temperature (130°C -180°C) presenta la stessa importanza delle prove dinamiche perché è a queste temperature che avviene la modifica con i polimeri ed il miscelamento con il materiale litoide per preparare la base della pavimentazione.

Una buona miscelazione è fondamentale per le proprietà leganti della base bituminosa. I bitumi modificati presentano comportamento viscoelastico in un intervallo di temperatura più ampio rispetto alle basi non modificate e la transizione a liquido Newtoniano avviene a temperature molto più alte, a volte superiori perfino ai 120°C.

Sotto questa temperatura la viscosità presenta una marcata dipendenza dalla velocità di deformazione a taglio o "shear rate" (comportamento non-Newtoniano). Tale proprietà è studiata con prove in regime di scorrimento, aumentando progressivamente la shear rate applicata e misurando la viscosità del campione in condizioni isoterme, a varie temperature. In caso di comportamento Newtoniano la viscosità rimane costante all'aumentare della shear rate. In genere i fluidi reali hanno comportamento Newtoniano per valori molto bassi della shear rate e il corrispondente valore di viscosità è definito "zero-shear rate viscosity". Lo studio di questa funzione è dettato dal fatto che sembra esserci una forte correlazione fra il fenomeno del rutting (formazione di ormaie dovute all'accumulo di deformazioni permanenti alle alte temperature) e la dipendenza della viscosità dalla shear rate.

A tal proposito, nell'ambito delle proprietà dinamiche, un metodo di misura largamente utilizzato per determinare le proprietà di un materiale polimerico in campo viscoelastico lineare è quello in cui un campione di polimero è sottoposto a una deformazione sinusoidale di scorrimento semplice. Dopo pochi cicli di avviamento, lo sforzo comincia a oscillare sinusoidalmente con la stessa frequenza della deformazione, ma non in fase con la deformazione. È possibile scomporre lo sforzo in componenti in fase e in quadratura con la deformazione, introducendo i due moduli dinamici G' e G'' , misura rispettivamente dell'energia immagazzinata e dell'energia dissipata dal materiale per ciclo di deformazione e per unità di volume; il rapporto G'/G'' è denominato fattore di smorzamento ed è comunemente noto come $\tan \delta$ o loss tangent, mentre i moduli G' e G'' sono denominati rispettivamente modulo elastico (storage modulus) e modulo viscoso (loss modulus).

La capacità di un elastomero vulcanizzato di modificare il proprio comportamento in funzione della frequenza imposta permette di prevederne le applicazioni, una volta note le condizioni a cui sarà sollecitato; inoltre, conoscendo l'influenza dei vari parametri molecolari sulle caratteristiche dinamiche, è possibile sintetizzare i materiali in funzione dell'applicazione finale. Un esempio rilevante è dato dal battistrada di uno pneumatico a cui vengono richieste doti di aderenza elevata (per esempio, wet traction, ovvero in condizioni di asfalto bagnato) in fase di frenata o di tenuta in curva accanto a una limitata resistenza al rotolamento (rolling resistance) nella marcia normale; in altre parole, si richiede al materiale con cui è stato costruito il battistrada di presentare un comportamento il più possibile simile a un solido elastico nella marcia normale (sollecitazioni a bassa frequenza: 102 Hz) e uno assimilabile a quello di un fluido viscoso in condizioni di trasferimento di energia dal veicolo alla strada (sollecitazioni ad alta frequenza: 105-106 Hz).

Considerando $F(\omega)$ una generica funzione dinamica, nel passare dalle basse alle alte frequenze le curve $\log F(\omega) - \log(\omega)$ cambiano decisamente aspetto. L'andamento delle curve di ognuna di queste funzioni presenta in genere delle zone distinte che forniscono molte informazioni sulle transizioni che il materiale subisce dallo stato vetroso allo stato viscoelastico e da questo a liquido Newtoniano. Inoltre le prove dinamiche costituiscono una buona valutazione della variazione delle proprietà reologiche in seguito a processi di invecchiamento accelerato del materiale, per verificarne la durabilità.

Consideriamo ora i bitumi normali e prendiamo come riferimento il grafico delle funzioni $G'(\omega)$ e $G''(\omega)$ così come riportato nel Grafico 5.1.

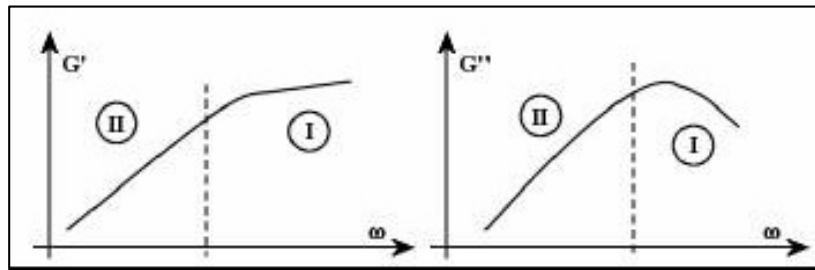


Grafico 5.1 - Andamento di $G'(\omega)$ e $G''(\omega)$

Zona I) – Alte Frequenze

Alle frequenze molto alte l'energia elastica immagazzinata nel sistema risulta molto maggiore di quella dissipata. All'aumentare della frequenza la componente dissipativa diminuisce sempre più ed in teoria si può arrivare alla condizione:

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} G'' = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \eta' = 0$$

che significherebbe, sulla base della teoria molecolare, che non sono presenti “aggiustamenti” delle catene polimeriche che possano dissipare energia.

In realtà questa condizione non è mai raggiunta, e le curve di $G''(\omega)$ presentano un massimo in corrispondenza della temperatura di transizione vetrosa.

Questa indicazione è piuttosto importante e viene visualizzata meglio se si riportano le curve di G'' in funzione della temperatura, utilizzando l'equazione di Williams – Landel – Ferry WLF per effettuare il cambio di variabile. Si fa notare che in ogni caso, se anche l'equazione scritta fosse veritiera, è estremamente difficile ottenerla sperimentalmente, sia perché non è possibile ottenere deformazioni uniformi a frequenze altissime, sia perché tali frequenze non sono raggiungibili dagli strumenti, che hanno comunque un limite meccanico dettato dall'inerzia del rotore.

Zona II) - Medio-basse Frequenze

Al diminuire della frequenza (che corrisponde a tempi lunghi di carico nelle prove a creep o ad alte temperature) prevale il comportamento dissipativo; questo passaggio è individuato dalla frequenza di crossover nella master curve. Per frequenze molto basse $G''(\omega)$ diventa direttamente proporzionale a ω , il che si traduce in una pendenza unitaria della curva $\log G''(\omega) - \log(\omega)$.

Questo significa anche che la viscosità dinamica η' , definita come il rapporto fra G'' e ω , raggiunge un valore costante, coincidente con la zero shear rate viscosity. A frequenze bassissime abbiamo $G'(\omega) \rightarrow 0$, ma questo dato non ha particolare interesse pratico.

Si è visto che il massimo della funzione G'' determina la temperatura di transizione vetrosa. Lo studio di altre funzioni dinamiche permette invece di vedere la transizione dei bitumi base da

liquidi viscoelastici a liquidi Newtoniani. Il contributo del flusso viscoso è sempre presente nelle funzioni dinamiche, ma nella *loss compliance* può essere esplicitato come un termine:

$$J''(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{L(\lambda)}{1 + \omega^2 \lambda^2} d \ln \lambda + \frac{1}{\eta_0 \omega}$$

dove $L(\lambda)$ è lo spettro dei tempi di ritardo, ω la frequenza ridotta e η_0 la *zero-shear rate viscosity*. La master curve di $J''(\omega)$ presenta alle basse frequenze un asintoto orizzontale che permette di stimare la *zero-shear rate viscosity* e quindi sottrarre il contributo viscoso al flusso. In questo modo si ottiene una nuova funzione definita come *modified loss compliance*:

$$J''_e(\omega) = J''(\omega) - \frac{1}{\eta_0 \cdot \omega}$$

il grafico di $J''_e(\omega)$ presenta un massimo nella regione a bassa frequenza, che individua la transizione da liquido viscoelastico a liquido Newtoniano. In maniera analoga e' anche possibile costruire una *modified loss tangent*:

$$\tan \delta_e(\omega) = \frac{J''_e(\omega)}{J'(\omega)} = \frac{J''(\omega) - \frac{1}{\eta_0} \omega}{J'(\omega)}$$

che presenta un unico picco molto accentuato alla frequenza di transizione, dove è massima la differenza fra $J''_e(\omega)$ e $J'(\omega)$. In termini energetici è la differenza fra l'energia dissipata in maniera "non viscosa" e l'energia immagazzinata. La spiegazione di questo fenomeno è legata alla mobilità delle molecole, che oltre a scorrere le una sulle altre dissipando calore "per attrito", possono anche muoversi più o meno liberamente, "consumando" in questo modo parte dell'energia disponibile.

I bitumi modificati spesso presentano un andamento dei moduli dinamici qualitativamente simile a quello delle basi, ma con variazioni piuttosto notevoli nei valori assoluti. Il confronto dei grafici della *loss tangent* per i due materiali può essere utile per visualizzare meglio gli effetti della modifica sulle proprietà meccaniche.

A causa della morfologia ancora più complessa rispetto alle basi bituminose, i PMA sembrano presentare al variare della temperatura molte modifiche strutturali. Dato che alcune di queste transizioni sono "mascherate" dal flusso viscoso, specialmente quando avvengono a temperature abbastanza alte, la *modified loss tangent* è più sensibile della *loss tangent* nell'individuazione delle frequenze critiche. Confrontando infatti sullo stesso grafico $J'(\omega)$ e $J''_e(\omega)$, può capitare che le due funzioni si intersechino in più punti (cosa che non accade per $J'(\omega)$ e $J''(\omega)$); di conseguenza la *modified loss tangent* non presenta un unico picco ma più massimi e minimi locali.

5.3.3. Processi di produzione del conglomerato con l'impiego di gomma

I processi adottati per la realizzazione del conglomerato bituminoso con granulato di gomma sono due: l'uno definito Wet che consiste nell'aggiungere la gomma, generalmente sotto forma di polverino, al bitume ottenendo così un legante modificato; l'altro denominato Dry che prevede l'uso sia del polverino che della gomma granulata in guisa di aggregato che integra l'inerte tradizionale, dando luogo a un conglomerato bituminoso additivato a caldo.

La quantità del granulato rappresenta una variabile determinante per le proprietà reologiche e meccaniche del prodotto finale in entrambi i processi. La quantità di gomma che generalmente viene aggiunta, durante il processo Wet è compresa tra il 10 ed il 30% in peso del legante: si riscontra che valori superiori al 10% ampliano il campo di temperatura di applicazione del conglomerato realizzato; mentre percentuali inferiori agiscono esclusivamente sulle alte temperature.

Il processo Wet non comporta modifiche significative al normale impianto di produzione di conglomerato a caldo, non dovendosi adottare speciali apparecchiature per la preparazione e applicazione del materiale.

Tale processo può essere discontinuo (bitume e polverino vengono mescolati all'atto della produzione del conglomerato) ovvero continuo (produzione continua di bitume modificato con gomma). La gomma, come elemento di costituzione del polverino, in definitiva conferisce al legante una migliore elasticità e flessibilità, mentre gli antiossidanti, stabilizzanti e riempitivi ne ritardano l'invecchiamento .

Il processo Dry implica un più massiccio consumo di gomma di circa dieci volte superiore a quella che ottimizza il processo Wet.

Ciò nonostante, il processo Dry riscuote un minor successo in campo applicativo attribuibile alla necessità di un'accurata preparazione del conglomerato, all'adozione di specifiche condizioni di stesa e costipamento, all'idonea ed accurata formulazione della curva granulometrica di progetto.

Diverse applicazioni hanno messo in evidenza che i leganti modificati con gomma manifestano prestazioni superiori ai leganti tradizionali e a volte anche a quelli modificati con altri additivi (polimeri).

Con il processo Wet, infatti, si ottiene un legante di caratteristiche reologiche migliorate rispetto al bitume originario in virtù della maggiore densità, del maggiore punto di rammollimento, della minore suscettività termica, della maggiore resistenza allo scorrimento, del minore invecchiamento, della minore tendenza alla fessurazione nei climi freddi, dell'ottima impermeabilità all'acqua e all'adesione all'aggregato.

Questi requisiti li rendono particolarmente idonei all'uso in alcune applicazioni quali, ad esempio, quelle dei conglomerati drenanti che, richiedendo cospicue quantità di legante, rischiano di penalizzare la resistenza allo scorrimento e la stabilità della miscela stessa. Importante è la capacità della gomma di assicurare al legante proprietà adesive (oltre che coesive), penalizzate invece dall'uso di altri rifiuti speciali quali le plastiche, ovvero stazionarie per altri additivi di uso comune (polimeri).

Nel processo Dry, le particelle di gomma fungono da microammortizzatori visco-elastici migliorando la risposta del conglomerato alle sollecitazioni ed impedendo, per effetto dell'assorbimento di una frazione del bitume, fenomeni di sfioramento e sgranamento.

In esercizio l'impiego della gomma nei conglomerati bituminosi si è tradotto in un aumento della vita utile delle pavimentazioni, in una maggiore resistenza al ghiacciamento e alla riduzione del fenomeno di aquaplaning, del rumore di rotolamento, della risalita delle fessurazioni presenti negli strati, in una maggiore aderenza e in una migliore visibilità. Inoltre è importante citare che nel 1996 la Federal Highway Administration ed il National Institute of Occupational Safety and Health hanno avviato studi sulle tecnologie di utilizzazione, sui costi di produzione e, soprattutto, sulla compatibilità ambientale e sui rischi per la salute nelle operazioni di lavorazione dei conglomerati, i cui primi risultati, confermati da successivi studi, non hanno pregiudicato l'impiego del nuovo materiale; anzi hanno rivelato come alcuni elementi inquinanti vengono emessi in percentuale minore, o addirittura scompaiono, rispetto a quanto avviene durante la lavorazione di conglomerati tradizionali.

5.4. Indagine sperimentale su materiale asphalt rubber

5.4.1. Prelievo del materiale e preparazione dei campioni

Il materiale Asphalt Rubber, utilizzato ai fini della presente ricerca, è stato prelevato presso un cantiere stradale in provincia di Reggio-Emilia, in località Cella, dove è stata realizzata una nuova strada, in prossimità del centro del paese, di una lunghezza pari a circa 2 Km. I campioni prelevati sono stati portati presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura (DICATeA) della Facoltà di Ingegneria di Parma, dove sono stati successivamente preparati per le prove di laboratorio.

I metodi utilizzati per preparare i provini sono stati:

- 1) il metodo Marshall;
- 2) la compattazione, per mezzo della pressa giratoria Superpave gyratory.

E' importante sottolineare che, mentre la tecnica Marshall trasferisce l'energia al materiale in modo impulsivo e con incrementi discreti e costanti, la pressa giratoria imprime in un primo e breve momento un carico crescente fino a raggiungere una pressione di 600 kPa che viene poi mantenuta costante per tutta la fase di compattazione nel corso della quale vi è anche un'azione centrifuga. L'energia viene così trasferita in maniera prettamente dinamica con la tecnica Marshall e in modo quasi statico con la pressa giratoria.

1) Preparazione dei provini con il metodo Marshall

Il materiale campionato è stato posto in forno alla temperatura di 184 °C per un tempo di 4 ore circa, insieme a 5 fustelle, (di diametro 100 mm), necessarie allo svolgimento della prova. Successivamente sono stati pesati 5 quantitativi del peso approssimativo di 1 kg e rimessi in forno. Esaurito il tempo per l'invecchiamento a breve termine e prelevato il materiale ad una temperatura di 165°C, sono stati preparati i 5 provini con la tecnica Marshall (Foto 5.2), inserendo alla base della fustella un disco di carta unitamente a 1 Kg di materiale coperto da un altro disco di carta. Sottoponendo il conglomerato all'azione del martello battente, avviene il costipamento determinato dal numero di colpi esercitati dal maglio. Tale numero descrive il terzo livello di compattazione che la procedura considera in relazione al traffico ed indipendentemente dalla temperatura: i 75 colpi per faccia, rappresentano un traffico superiore a 106 passaggi ESAL. Dopo 12-15 minuti dalla compattazione, al termine del processo, si è provveduto all'estrusione dalla fustella del campione finale. I dati di altezza dei 4 provini sui quali è stata effettuata la successiva prova di stabilità sono riportati in Tab. 5.1.



Foto 5.2 - Compattazione Marshall

Provino n °	H1 (cm)	H2 (cm)	H3 (cm)	Hm (cm)
1N	6,28	6,45	6,3	6,34

2N	6,28	6,13	6,35	6,25
3N	6,07	6,2	6,2	6,12
4N	6,25	6,37	6,24	6,28

Tab. 5.1 - Altezza provini sottoposti alla prova di stabilità

- 2) Preparazione dei provini con pressa giratoria (superpave gyratory)
- 3) Lo stesso materiale (prelevato nel cantiere precedentemente menzionato) è stato utilizzato per confezionare 9 provini con pressa giratoria (Foto 5.3). Si è proceduto innanzitutto ponendo il materiale in forno ad una temperatura di 166 °C per circa 4 ore; successivamente è stato prelevato ad una temperatura di 140 °C e suddiviso in parti da 1 Kg circa e infine riposto in forno insieme ad una fustella.

La pressa giratoria è stata impostata con i seguenti parametri di prova:

- angolo di inclinazione 1.25°;
- diametro della fustella 100 mm;
- pressione di costipamento 600 Kpa;
- numero di giri prefissato pari a 100.

Sul fondo della fustella estratta dal forno è stato quindi posto un disco di carta è successivamente versato 1 Kg circa di materiale sigillato superiormente da un altro disco di carta. Si è quindi proceduto con l'inserimento della fustella nella pressa e dato avvio alla compattazione, ricavando così il provino da estrarre per mezzo di un estrusore assemblato al corpo della pressa.



Foto 5.3 - Compattazione per mezzo di pressa giratoria Superpave Giratory.

Nel Grafico 5.2 e Grafico 5.3 sono riportati i risultati del andamento dell' addensamento relativo % e dell'altezza del provino in funzione del numero dei giri della pressa giratoria.

Osservando tali grafici si può riscontrare un risultato già ben noto in letteratura, ovvero la diminuzione del contenuto di vuoti all'aumentare dell'energia di costipamento. In particolare è

possibile verificare che la maggior parte dell'addensamento per tutti i provini sembra avvenire per un numero compreso tra 50 e 100 giri. In effetti durante il costipamento giroscopico, sebbene agiscano all'interno del campione azioni interne complesse (normali, taglienti e torcenti), che favoriscono un migliore arrangiamento e rimescolamento degli aggregati, non si notano rilevanti cambiamenti di valore dell'addensamento, rispetto ai provini Marshall.

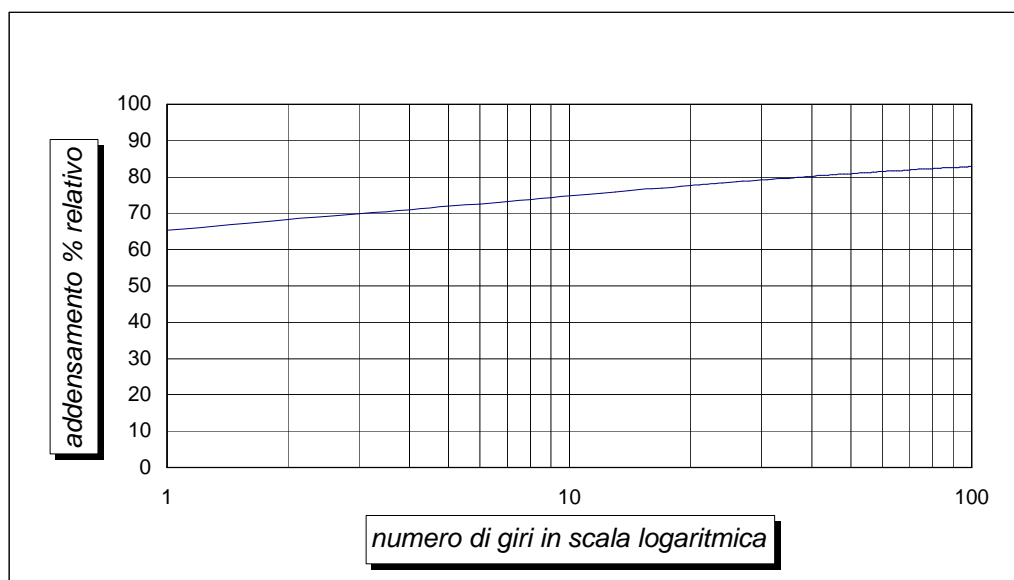


Grafico 5.2 - Andamento dell'addensamento relativo % - n° di giri in un campione

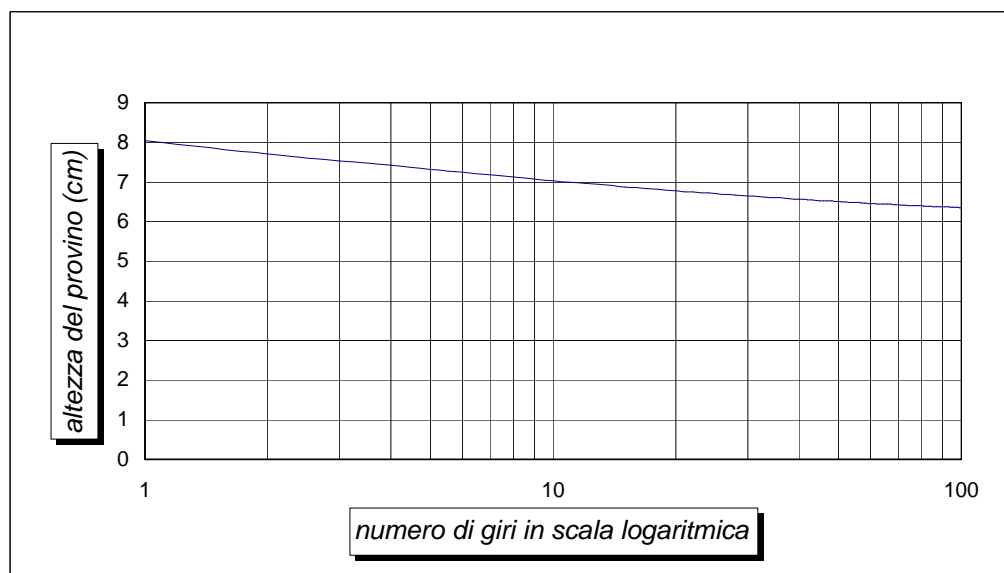


Grafico 5.3 - Andamento altezza del provino – n° di giri in un campione

Si riporta quindi in Tab. 5.2 i valori di densità volumetrica dei 9 provini compattati con pressa girettoria.

Provino	H1	H2	H3	H4	Hm	Peso	Volume	Densità

1	6,260	6,320	6,280	6,230	6,273	968,6	492,6802	1,965981
2	6,320	6,320	6,330	6,350	6,330	976,4	497,1569	1,963967
3	6,230	6,320	6,270	6,320	6,285	969,1	493,6226	1,963241
4	6,300	6,260	6,270	6,210	6,260	976,6	491,6591	1,986335
5	6,340	6,310	6,280	6,330	6,315	981,4	495,9788	1,978713
6	6,500	6,530	6,520	6,510	6,515	1009,7	511,6868	1,973277
7	6,370	6,350	6,360	6,380	6,365	969,7	499,9058	1,939765
8	6,490	6,470	6,450	6,470	6,470	995,8	508,1525	1,959648
9	6,600	6,550	6,550	6,570	6,568	1007,2	515,8494	1,952508

Tab. 5.2 - Valori di densità volumetrica dei 9 provini

5.4.2. Prove sperimentali di laboratorio sui campioni

Sui campioni preparati sono state effettuate diverse prove, al fine di caratterizzare al meglio il bitume modificato con PFU. Di seguito vengono pertanto descritte le modalità esecutive delle prove e i risultati ottenuti.

A) Prova Marshall

La prova Marshall (Foto 5.4), per la determinazione della stabilità e dello scorrimento del conglomerato bituminoso, è stata effettuata su 4 campioni. Il processo eseguito consiste nel mettere i provini in bagno termostatico alla temperatura di 60 °C, per la durata di 30 minuti e quindi disporli nella relativa pressa. Il carico applicato con velocità costante di deformazione pari a 51 mm/min, ha portato ogni provino a rottura, secondo dati riportati in Tab. 5.3. I valori medi quindi riscontrati contale prova per la stabilità 3,77 KN e per lo scorrimento 3,20 mm.

Provino	Hm	Stabilità (KN)	Scorrimento (mm)
1N	6,34	4	2,65
2N	6,25	3,76	3,86
3N	6,12	3,54	2,69
4N	6,28	3,78	3,58

Tab. 5.3 - Valori di stabilità corretta e scorrimento ricavati dalla prova Marshall



Foto 5.4 - Prova Marshall, provino giunto a rottura per schiacciamento

B) Determinazione della densità Marshall

Il provino Marshall n° 5 (Foto 5.5), è stato selezionato per ricavare la densità tramite il metodo della paraffina (secondo la norma CNR N°40-73). Si è proceduto a pesare il provino su bilancia digitale e scaldare la paraffina mediante fornello elettrico sino a portarla allo stato liquido. La procedura comprende 3 immersioni nella cera: una per ogni base del provino cilindrico, ed una laterale, eseguita ruotando contemporaneamente il campione. Dopo aver atteso 10 minuti, necessari a far raffreddare la cera, è stata effettuata la pesata idrostatica del provino paraffinato, immergendolo a 20°C nell'acqua distillata della vasca. Una volta ricavati il peso del campione secco, il peso del campione con paraffina ed il peso del campione paraffinato immerso nell'acqua, si possono ottenere analiticamente il volume complessivo del provino (compresa la paraffina), il volume della paraffina, il volume del provino al netto della paraffina ed infine la densità. Il valore finale della densità è risultato pari a 2,03 g/cm³ (Tab. 5.4) .



Foto 5.5 - Provino Marshall sottoposto al test della densità secondo norma CNR N°40-73

Camp. N°	Peso Campione secco P1 (g)	Peso Campione con paraffina P2 (g)	Peso campione con paraffina immerso in Acqua P3 (g)	Volume complessivo provino compresa paraffina V1=P2-P3 (cm ³)	Volume Paraffina V2=(P2-P1)/0,89 (cm ³)	Volume Provino V3=V1-V2 (cm ³)	Densità D=P/V3 (g/cm ³)
5N	963,00	982,30	486,30	496,00	21,69	474,31	2,03

Tab. 5.4 - Determinazione della densità secondo norma CNR N°40-73

C) Densità assoluta: metodo G.M.M

Scopo di tale prova è quello di determinare la densità del materiale in assenza di vuoti. Dopo aver riscaldato il materiale Asphalt Rubber per circa 3 ore in forno alla temperatura di 166°C, è stato steso su un foglio di carta da forno e lasciato raffreddare a temperatura ambiente per 24 ore (Foto 5.6). Pesati circa 300 g di materiale spezzettato grossolanamente, è stato inserito il tutto nel picnometro e aggiunta dell'acqua distillata sino a un livello tale da superare il conglomerato di 1,5-2 cm circa. La fase seguente consiste nel collegare il picnometro ad una pompa che, agendo per 20 minuti, crea un vuoto e quindi una depressione, permettendo in tal modo di aspirare l'aria trattenuta nei vuoti del materiale immerso. Una volta staccato il picnometro dalla pompa e rimboccato con acqua distillata sino a raggiungere il livello equivalente di un litro, si proceduto a pesare l'insieme dei prodotti e successivamente il picnometro in assenza di conglomerato. Con questo ultimo dato sperimentale è possibile quindi ottenere per via analitica la densità assoluta del materiale, pari a 2,36 g/cm³ (Tab. 5.5).



Foto 5.6 - Materiale Asphalt Rubber nella fase di raffreddamento a temperatura ambiente

<i>peso inerte (secco)</i> <i>(g)</i>	<i>Temperatura Acqua</i> <i>(°C)</i>	<i>Peso picnometro + acqua</i> <i>(g)</i>	<i>Peso picnometro + Acqua + inerte</i> <i>(g)</i>	<i>Volume inerti (P1+P2)-P3</i> <i>(g/cm³)</i>	<i>Peso specifico acqua alla temp. T1</i> <i>(g/cm³)</i>	<i>Peso Specifico (P1/V1)* γ_w</i> <i>(g/cm³)</i>
<i>P1</i>	<i>T1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>	<i>V1</i>	<i>(γ_w)</i>	<i>ρ</i>
<i>301,20</i>	<i>25</i>	<i>1824,40</i>	<i>1998,30</i>	<i>127,30</i>	<i>0,99800</i>	<i>2,36</i>

Tab. 5.5 - Densità assoluta del materiale Asphalt Rubber con il metodo G.M.M

D) Prova di trazione indiretta (prova brasiliana)

La prova brasiliana misura la resistenza a trazione indiretta e la deformazione a rottura. Su ogni provino sono state fatte 4 misure dell'altezza prese planimetricamente a 90° l'una dall'altra e 6 misure diametrali (2 per ogni base e 2 a metà altezza). I valori medi di altezza e diametro dei 9 provini sono riportati nella Tab. 5.6 e Tab. 5.7.

In riferimento a tale prova si definisce:

- resistenza a trazione indiretta: la resistenza determinata sottoponendo un provino cilindrico a rottura, mediante un carico di compressione diametrale;
- trazione indiretta a rottura per compressione diametrale: l'allungamento unitario del diametro del provino, provocato dal carico di rottura e misurato sul piano assiale perpendicolare a quello di carico;
- compressione a rottura per compressione diametrale: l'accorciamento unitario del diametro del provino, provocato dal carico di rottura e misurato sul piano assiale di carico.

La prova è stata effettuata su tre gruppi di campioni, ogni gruppo composto da 3 provini confezionati con pressa giratoria. La scelta fatta consiste nel sottoporre il primo gruppo a un bagno termostatico in acqua e ghiaccio, lasciando l'insieme per un'ora all'interno della cella frigorifera ad una temperatura di 3 °C, al fine di ottenere un campione di temperatura paria a 5 °C. Il secondo ed il terzo gruppo sono stati immersi nel bagno termostatico per un'ora, (rispettivamente alla temperatura di 25 e 40 °C), progressivamente prelevati e collocati fra i piatti della pressa. Applicando una velocità costante di deformazione dei provini pari a 0,85±0,05 mm/sec sino al raggiungimento del carico di rottura (Foto 5.7), sono stati ottenuti i valori sperimentali riportati in Tab. 5.8, Tab. 5.9 e Tab. 5.10.

ALTEZZE	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	h ₃ (cm)	h ₄ (cm)	h _m (cm)
PROVINO n° 01	6,260	6,320	6,280	6,230	6,273
PROVINO n° 02	6,320	6,320	6,330	6,350	6,330
PROVINO n° 03	6,230	6,320	6,270	6,320	6,285
PROVINO n° 04	6,300	6,260	6,270	6,210	6,260
PROVINO n° 05	6,340	6,310	6,280	6,330	6,315
PROVINO n° 06	6,500	6,530	6,520	6,510	6,515
PROVINO n° 07	6,370	6,350	6,360	6,380	6,365
PROVINO n° 08	6,490	6,470	6,450	6,470	6,470
PROVINO n° 09	6,600	6,550	6,550	6,570	6,568

Tab. 5.6 - Altezze medie dei provini della prova brasiliana

DIAMETRI	D ₁₁ (cm)	D ₂₁ (cm)	D ₃₂ (cm)	D ₄₂ (cm)	D ₅₃ (cm)	D ₆₃ (cm)	D _m (cm)
PROVINO n° 01	10,000	10,000	9,970	10,020	9,990	9,940	9,987
PROVINO n° 02	9,980	10,020	10,040	10,080	10,020	10,030	10,028
PROVINO n° 03	10,070	10,000	10,040	10,030	9,990	10,030	10,027
PROVINO n° 04	10,060	10,080	10,000	10,070	10,000	9,930	10,023
PROVINO n° 05	10,060	10,060	10,080	10,080	10,050	10,030	10,060
PROVINO n° 06	10,050	10,060	10,020	10,040	10,050	9,930	10,025
PROVINO n° 07	10,020	10,000	10,060	10,020	9,970	10,000	10,012
PROVINO n° 08	9,990	9,990	10,010	10,020	9,970	10,000	9,997
PROVINO n° 09	10,050	10,020	9,900	9,980	9,940	9,950	9,973

Tab. 5.7 - Diametri medi dei provini della prova brasiliana

	ROTTURA	SPOST.	SPOST.	DEFORMAZ.	DEFORMAZ.	RES.TRAZ.R _c	RES.COMP.R _c	TEMP.
	CARICO kN	VERT. (mm)	ORIZ. (mm)	VERT.	ORIZ.	daN/cm ²	daN/cm ²	C°
PROVINO n° 01	5,090	2,220	0,470	0,022230	0,004706	5,173	-15,519	25,00
PROVINO n° 02	5,290	2,090	0,810	0,020841	0,008077	5,305	-15,916	25,00
PROVINO n° 03	5,310	2,370	1,080	0,023637	0,010771	5,364	-16,093	25,00

Tab. 5.8 - Valori ottenuti dal gruppo 1 nella prova brasiliana eseguita a 25 °C

	ROTTURA	SPOST.	SPOST.	DEFORMAZ.	DEFORMAZ.	RES.TRAZ.R _c	RES.COMP.R _c	TEMP.
	CARICO kN	VERT. (mm)	ORIZ. (mm)	VERT.	ORIZ.	daN/cm ²	daN/cm ²	C°
PROVINO n° 04	16,160	2,310	0,430	0,023046	0,004290	16,396	-49,188	25,00
PROVINO n° 05	17,860	1,920	0,470	0,019085	0,004672	17,897	-53,692	25,00
PROVINO n° 06	16,410	1,310	0,230	0,013067	0,002294	15,995	-47,986	25,00

Tab. 5.9 - Valori ottenuti dal gruppo 2 nella prova brasiliana eseguita a 5 °C

	ROTTURA	SPOST.	SPOST.	DEFORMAZ.	DEFORMAZ.	RES.TRAZ.R _c	RES.COMP.R _c	TEMP.
	CARICO kN	VERT. (mm)	ORIZ. (mm)	VERT.	ORIZ.	daN/cm ²	daN/cm ²	C°
PROVINO n° 07	2,610	2,410	1,150	0,024072	0,011487	2,607	-7,822	25,00
PROVINO n° 08	3,070	2,260	1,110	0,022608	0,011104	3,022	-9,065	25,00
PROVINO n° 09	3,030	2,340	0,600	0,023463	0,006016	2,945	-8,835	25,00

Tab. 5.10 - Valori ottenuti dal gruppo 3 nella prova brasiliana eseguita a 40 °C



Foto 5.7 - Rottura del provino n° 1 sottoposto alla prova brasiliana

E) Granulometria per via umida

Il metodo sperimentale serve a valutare l'assortimento granulare e il grado di particelle fini adese all'aggregato. La tipologia di inerte, selezionato per la seguente prova, è quella impiegato nel Asphalt Rubber esaminato precedentemente ed è composto da tre diverse pezzature, rispettivamente 1,5; 1 e 0,5 cm, e da filler (Foto 5.8) . Il procedimento consiste nel pesare il materiale di partenza e quello trattenuto da crivelli e setacci, una volta lavato e fatto asciugare sino al mantenimento del peso costante. Il peso costante viene definito come la perdita in peso <1%0 misurata in pesate successive ogni ora, alla temperatura di $T = 100 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. I dati relativi alla prova sono riportati in Tab. 5.11 e Grafico 5.4.



Foto 5.8 - Pietrisco di pezzatura 1,5 cm trattenuto da crivelli da 10 e 5 mm

Setacci e/o	Peso	Peso	Peso Inerte	Peso Inerte	Peso Inerte	Percentuale	Percentuale
-------------	------	------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

crivelli U.N.I	setaccio crivello (g)	setaccio crivello+ (g)	trattenuto setaccio (g)	trattenuto progressivo (g)	passante progressivo (g)	progressiva trattenuta (%)	progressiva passante (%)
40,0	0,00	0,00	0,00	0,00	1092,90	0,00	100,00
25,0	0,00	0,00	0,00	0,00	1092,90	0,00	100,00
20,0	0,00	0,00	0,00	0,00	1092,90	0,00	100,00
15,00	1159,30	1159,30	0,00	0,00	1092,90	0,00	100,00
10,00	1320,50	2166,80	846,30	846,30	246,60	77,44	22,56
5,000	1204,90	1445,50	240,60	1086,90	6,00	99,45	0,55
2,000	0,00	0,00	0,00	1086,90	6,00	99,45	0,55
1,000	0,00	0,00	0,00	1086,90	6,00	99,45	0,55
0,500	0,00	0,00	0,00	1086,90	6,00	99,45	0,55
0,250	0,00	0,00	0,00	1086,90	6,00	99,45	0,55
0,180	0,00	0,00	0,00	1086,90	6,00	99,45	0,55
0,075	0,00	0,00	0,00	1086,90	6,00	99,45	0,55
FONDELLO	0,00	6,00	6,00	1092,90	0,00	100,00	0,00

$G_{si} = 1092,9$

Perdita % in peso = 0,00

$G_{sf} = 1092,9$

Tab. 5.11 - Analisi granulometrica "CCPL BARCACCIA PIETRISCO 1,5 - 26/08/08"

Secondo normativa CNR BU 23/71

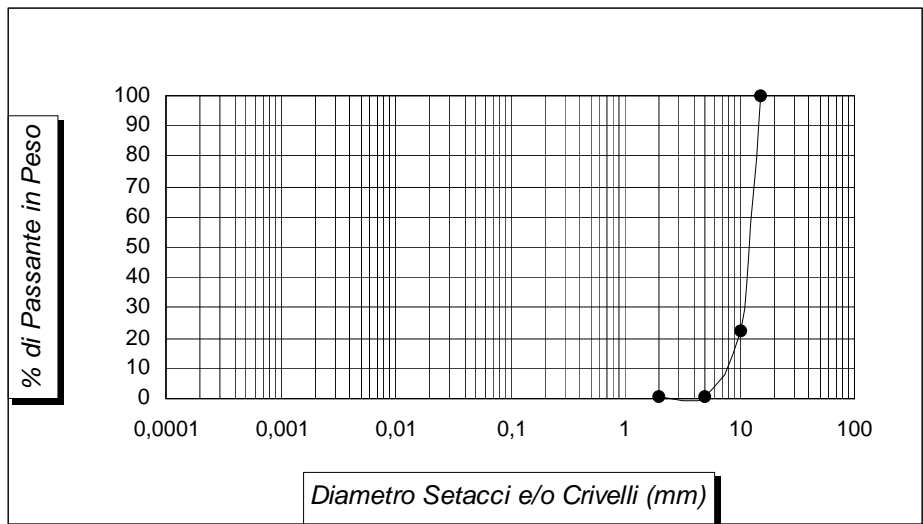


Grafico 5.4 - Curva granulometrica "CCPL BARCACCIA PIETRISCO 1,5 - 26/08/08",

secondo normativa CNR BU 23/71

F) Peso specifico degli aggregati

Il test è stato effettuato sul materiale di pezzatura 1,5-1 cm, preventivamente lasciato essiccare in forno per 24 ore. Dopo aver messo nel picnometro circa 300 g di inerti, è stata versata acqua distillata sino a raggiungere un livello di circa 2 cm superiore rispetto a quello degli aggregati (Foto 5.9). Portando ad ebollizione il contenuto d'acqua del picnometro, per mezzo di un fornello elettrico, si è lasciato il materiale in tale configurazione per circa 20 minuti e poi è stato fatto raffreddare a temperatura ambiente (25°C circa). Le fasi seguenti si ripropongono identiche al processo svolto per il G.M.M, una volta estratta l'aria dal materiale. In Tab. 5.12 sono riportati i risultati ottenuti.

pezzatura inerti (cm)	peso inerte (secco) (g) P1	Temperatura acqua (°C) T1	Peso picnometro + acqua alla temp. T1 (g) P2	Peso picnometro + acqua+inerte (g) P3	Volume inerti (P1+P2)-P3 (g/cm ³) V1	Peso specifico acqua alla temp. T1 (g/cm ³) i(γ_w)	Peso specifico (P1/V1)* γ_w (g/cm ³)
1,5	299,70	20	1324,10	1511,60	112,20	0,99800	2,67
1	299,70	20	1330,10	1517,30	112,50	0,99800	2,66

Tab. 5.12 - Peso specifico aggregati "CCPL BARCACCIA PIETRUISCO 1,5-1 - 26/08/08"

Secondo normativa CNR BU 62/78



Foto 5.9 - Misura del peso del picnometro contenente aggregato da 1,5 cm e acqua distillata

G) Prove di penetrazione e palla anello

Il bitume modificato, utilizzato nel materiale Asphalt Rubber, è stato mescolato e campionato in un contenitore cilindrico di diametro interno 70,8 mm e altezza 45 mm, per essere nuovamente riposto nel forno alla temperatura di 150 °C, per circa 20 minuti: così facendo l'aria viene espulsa sotto forma di bolle che risalgono in superficie, assicurando un campione omogeneo. Dopo aver lasciato il campione raffreddare a temperatura ambiente per 12 ore circa, è stato condizionato in bagno termostatico a 25 °C per 1 ora ed è stata eseguita la prova di penetrazione (Foto 5.10). Vista l'eterogeneità del materiale, i valori di penetrazione riscontrati sono molto discostanti e ben al di fuori dei valori di tolleranza da normativa: diventa quindi difficile ottenere un valore medio (Tab. 5.13). Per quanto attiene la prova della palla anello, ha dato un valore di temperatura di rammollimento pari a $T_{pa}=55,5$ °C.



Foto 5.10 - Esecuzione della prova di penetrazione

Prima lettura	Seconda lettura	valori di penetrazione
0	77	77
26	109	83
29	101	72
30	104	74
31	101	70
32	101	69

Tab. 5.13 - Risultati ottenuti dal test di penetrazione, secondo Norma CNR B.U. 24/71

5.5. Conclusioni

L'applicazione del PFU in ambito stradale, ed in particolare nei bitumi modificati (asphalt rubber), ha permesso di verificare che l'utilizzo di materiale in gomma all'interno della mescola

migliora le proprietà dell'asfalto stesso. La realizzazione di un tratto stradale in località Cella di Reggio Emilia di circa 2 Km ha permesso di sperimentare in situ la validità di tale materiale. Infatti, i campioni prelevati ed analizzati in laboratorio, hanno mostrato ottimi risultati in ottemperanza a quanto stabilito dalle relative norme vigenti. L'asphalt rubber mostra inoltre una serie di vantaggi rispetto ai tradizionali bitumi, sia in termini di benefici prestazionali che in termini di durabilità. Tuttavia, i maggiori costi per unità di superficie del materiale, spesso disincentivano il suo utilizzo, anche se esso viene ampiamente "ripagato" dalla minor costo di manutenzione rispetto ad un asfalto tradizionale.

6. APPLICAZIONE DEL METODO LCA ALL'AZIENDA DI RECUPERO PNEUMATICI AMBRA AMBIENTE

6.1. La società Ambra Ambiente

La società consortile AMBRA AMBIENTE di Ravenna nasce dalla professionalità delle maggiori cooperative operanti da anni sul territorio regionale e nazionali con l'obiettivo di rappresentare l'anello specialistico della cooperazione ravennate nel settore dei servizi ecologico-ambientali. La scelta della forma consortile consente di sfruttare tutte le potenzialità tecnico-operative delle relative cooperative associate.

AMBRA si propone come obiettivo la fornitura "chiavi in mano" relativamente alla raccolta, al trasporto e allo smaltimento di rifiuti speciali pericolosi e non, a tutti i tipi di pulizie civili ed industriali, alle bonifiche di aree industriali, alle bonifiche di serbatoi con eventuale rilascio di certificato "gas free", alla rimozione, al trattamento e allo smaltimento finale di coperture in cemento amianto e dispone di un attrezzato laboratorio in grado di effettuare analisi chimiche complete in tempi brevi. AMBRA è proprietaria nei propri insediamenti di Cotignola e Massalombarda di due impianti per lo stoccaggio, la lavorazione e il recupero di cascami di gomma e di semilavorati da demolizione di pneumatici obsoleti mediante produzione di microgranuli e polverini. L'attività di recupero e valorizzazione del PFU nei due stabilimenti è sinteticamente illustrata in Fig. 6.1.

Nei sui stabilimenti Ambra ha avviato un'importante attività di recupero di pneumatici fuori uso, trasformando i suddetti "rifiuti", presi in carico a proprie spese, in materiali tecnici e in combustibili non convenzionali, rappresentando in tal modo un eccedente esempio di trasformazione e valorizzazione di tali materiali. Questo specialistico segmento di attività, oltre a rispondere a precisi canoni di legge che incentivano il recupero e il riutilizzo di scarti di produzione, rappresenta un'opportunità di sviluppo volta al rispetto ambientale del territorio, sottraendo così rifiuti alle discariche. Nei due stabilimenti arrivano pneumatici di autovetture ed autocarri provenienti dai demolitori di automezzi del territorio locale ma anche nazionale. I pneumatici di autovettura, che contengono materiali tessili e sono ricchi di oli aromatici, vengono generalmente destinati alla combustione nei cementifici o inviati alla discarica dove sono utilizzati come materiale tecnico, dopo semplice triturazione senza stallonatura. Quelli di autocarro invece, ricchi in gomma naturale, sono adatti alla produzione di granulato e polverino.

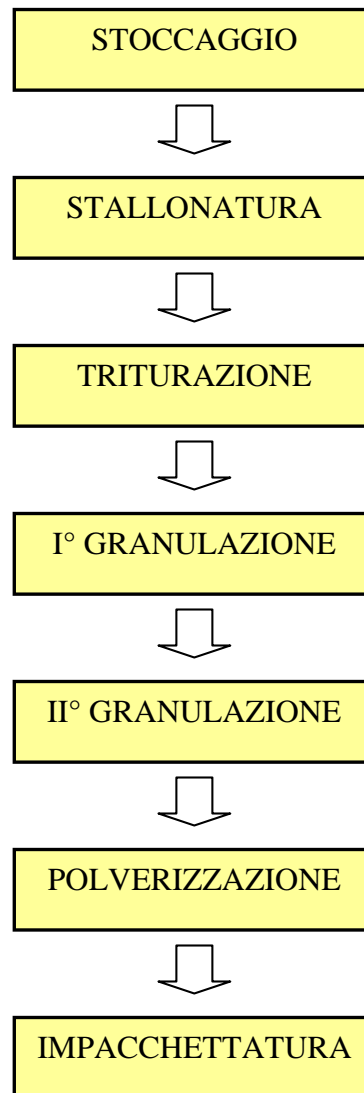


Fig. 6.1 - Diagramma attività e processo degli stabilimenti di AMBRA

Al fine di valutare correttamente e scientificamente gli impatti ambientali derivanti dall'attività svolta, AMBRA ha deciso di applicare il metodo LCA (Life Cycle Assessment) al suo stabilimento di Cotignola. Tale scelta è inoltre sostenuta dal fatto che il "rifiuto pneumatico", benché giunto a fine vita, conserva ancora più dell' 80% del suo contenuto materiale ed energetico. E' proprio questa sua peculiarità che offre diversi scenari di trattamento e permette di avviare altri nuovi cicli di vita.

L'obiettivo pertanto di tale studio è stato quello di quantificare gli impatti ambientali derivati dalla produzione di granulato e polverino e di identificare la fase critica, cioè quella a cui si associano maggiori carichi, di tutto il processo di lavorazione. La normalizzazione di tutto il sistema in esame è stata effettuata considerando un'unità funzionale pari a una tonnellata di pneumatici fuori uso (1.000 kg). Il peso di un pneumatico autocarro è stimato, in media, 65 kg. E' infatti importante, nella prima fase dell'analisi LCA, definire i confini del sistema per individuare gli input e gli output da considerare; tutti i processi realizzati hanno visto dati di input riguardanti i

flussi materiali e i flussi energetici di ogni processo, e dati di output relativi alle specifiche emissioni. La prima parte dello studio è l'analisi LCA del processo di produzione di granulato e polverino all'interno dell'Azienda Ambra, quindi un approccio "dal cancello al cancello", ciò significa che l'analisi si esplica in una regione spaziale delimitata: quella aziendale.

6.2. LCA: Life Cycle Assessment

6.2.1. *Che cos'è un LCA*

La consapevolezza del ritmo di crescita esponenziale dell'inquinamento globale, di pari passo con l'espansione industriale e con l'aumento dei progressi delle nuove tecnologie, pone al centro del grande dibattito sull'ambiente la ecosostenibilità di attività produttive, di servizi e di sistemi di gestione. Un qualsiasi processo produttivo può considerarsi ecosostenibile se riesce a soddisfare i bisogni delle generazioni presenti e considera la protezione ambientale come condizione necessaria per uno sviluppo duraturo a beneficio delle generazioni future. In questo contesto sta assumendo notevole importanza un nuovo strumento analitico: il Life Cycle Assessment (LCA), conosciuto in Italia come "Analisi del ciclo di vita". Le origini del concetto di "ciclo di vita" nell'ambito di un corretto sfruttamento delle risorse per realizzare uno sviluppo sostenibile risalgono agli anni '60. L'LCA ha come ultimo obiettivo l'identificazione dei carichi ambientali associati ad un prodotto, processo o attività, percorrendo l'oggetto dello studio in tutta la sua storia. Tale percorso, che si esplica sia a monte sia a valle della fase di utilizzo, inizia con l'estrazione delle materie prime dalla terra, attraversa la fase di lavorazione e utilizzo del prodotto e termina con il ritorno delle materie prime alla terra sotto forma di rifiuti, cioè lo smaltimento finale. L'insieme di queste macrofasi viene comunemente detto percorso "from cradle to grave", vale a dire "dalla culla alla tomba".

Il termine LCA, con cui in principio si intendeva indistintamente Life Cycle Assessment o Life Cycle Analysis, fu coniato durante il congresso della Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) di Smuggler Notch (Vermont-USA) nel 1990 per caratterizzare più dettagliatamente le analisi svolte fino ad allora con il nome di REPA (Resource and Environmental Profile Analysis).

La definizione stabilita è la seguente: "*è un procedimento oggettivo di valutazione di carichi energetici ed ambientali relativi ad un processo o attività, effettuato attraverso l'identificazione dell'energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell'ambiente. La valutazione include l'intero ciclo di vita del processo o attività, comprendendo l'estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale.*" Nella definizione vengono sottolineati alcuni aspetti: l'oggettività del procedimento, vale a dire l'esecuzione di fasi analitiche precise e ben determinate, nonché lo studio di dati confrontabili e scientificamente verificabili e la considerazione dell'intero ciclo di vita, che presuppone una visione globale del sistema in esame, poiché le fasi di uno stesso processo produttivo (Fig. 6.2) possono svolgersi in situazioni geografiche molto distanti l'una dall'altra. L'obiettivo da perseguire, nella prospettiva di un miglioramento futuro, è rappresentato dalla

valutazione degli impatti ambientali imputabili allo stato in essere del processo o dell'attività studiata, in modo da sviluppare in futuro interventi di natura preventiva. La quantificazione dei carichi ambientali del ciclo di vita di un prodotto o servizio avviene attraverso la contabilizzazione di tutti i consumi di materie prime, acqua e fonti energetiche, detti "input" e di tutte le emissioni gassose, liquide e solide, di rifiuti e di altri rilasci, detti "output". In particolare l'LCA valuta anche i "risparmi ambientali" dovuti alla produzione evitata di materiali ed energia grazie al riuso, al riciclo o alla termovalorizzazione del prodotto considerato. Infatti, è proprio grazie all'identificazione di criticità ambientali, in gergo "bottleneck" cioè "colli di bottiglia", che si può mirare all'ottimizzazione dei processi e dell'uso delle risorse.

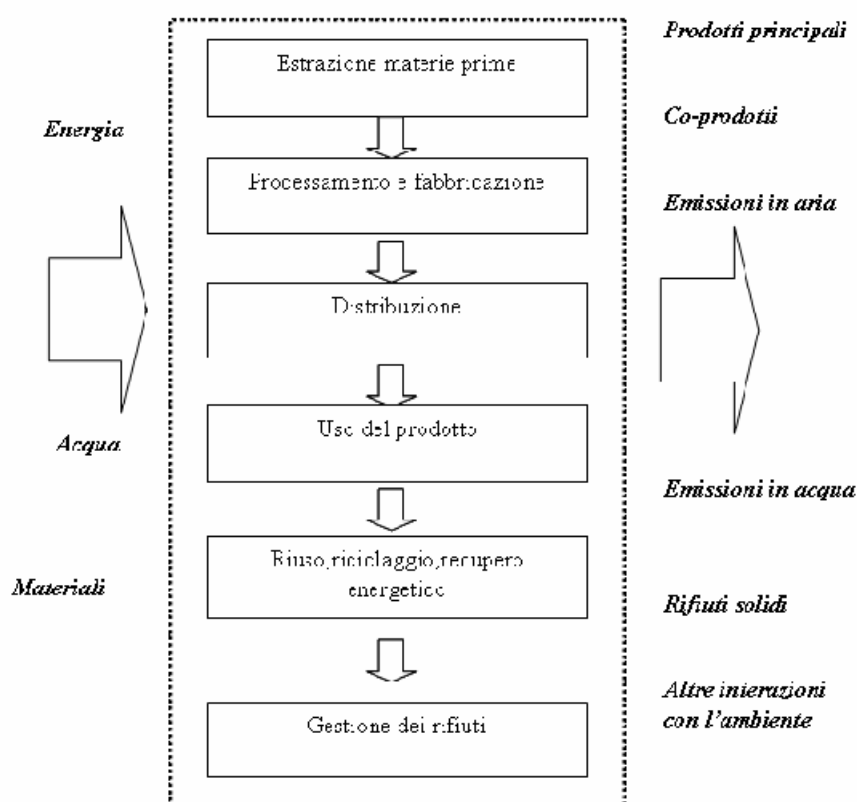


Fig. 6.2 - Schema di un sistema produttivo

Caratteristica fondamentale della LCA è l'approccio "from cradle to grave", metodologia del tutto innovativa che è stata dettata principalmente da due ragioni. In primo luogo una singola operazione industriale poteva apparentemente essere resa più efficiente e "più pulita" semplicemente trasferendo l'inquinamento in altri comparti ambientali: i benefici derivanti da queste azioni venivano controbilanciati dai problemi generati altrove, senza conseguire nel complesso alcun reale miglioramento. In secondo luogo si passa da una tipologia di studio tipica dell'ingegneria tradizionale, focalizzata sull'efficienza dei singoli sistemi produttivi, ad una visione globale dell'intera catena produttiva che tiene tra loro collegate le singole operazioni.

Dopo che la SETAC ne conì il termine, l'LCA vide il suo primo riferimento legislativo nell'art. 5 del Regolamento CEE 92/880 concernente il sistema comunitario di assegnazione di una

etichetta di qualità ecologica. In esso si afferma che: *...i criteri specifici per ogni gruppo di prodotti sono stabiliti secondo un metodo globale (dalla culla alla tomba)...*”. Difatti, l’unico modo per assegnare un marchio Ecolabel è quello di valutare il ciclo di vita complessivo del prodotto in esame per poi imporre restrizioni sulle fasi del sistema maggiormente responsabili di danni ambientali. In seguito, dal 1993 fino ad oggi, la International Standard Organization (ISO) e nello specifico il suo Technical Committee 207 (TC 207) ha provveduto a sviluppare una serie di norme relative a vari aspetti della gestione ambientale di impresa, abbracciando le esigenze di organizzazioni governative e non, consumatori e aziende. La valutazione del ciclo di vita, come detto, è utilizzata anche come metodologia indispensabile per qualsiasi schema di etichettatura ambientale di prodotto.

6.2.2. La metodologia LCA

La metodologia LCA si compone di quattro fasi principali:

- 1) Definizione degli obiettivi e dei confini del sistema (*Goal and scope definition*);
- 2) Redazione e analisi dell’inventario (*Inventory analysis*);
- 3) Valutazione degli impatti ambientali (*Life cycle impact assessment*);
- 4) Interpretazione dei risultati e analisi di miglioramento (*Interpretation and improvement analysis*).

La descrizione della metodologia segue fedelmente l’iter proposto dalle norme europee EN ISO 14040 e 14044 senza peraltro trascurare ulteriori approcci trasversali provenienti da altre pubblicazioni e da altri studi.

La definizione degli obiettivi è la prima fase di uno studio LCA e il suo scopo è un corretto svolgimento ed utilizzo dell’analisi; si dichiara l’oggetto dello studio, l’insieme delle sue motivazioni, il sistema considerato e tutti i suoi confini, inoltre si possono anche dichiarare gli utilizzatori ultimi dei risultati, per anticipare il grado di approfondimento e di trasparenza/chiarzza dell’analisi. La dichiarazione di specifici obiettivi dipende dall’ampiezza del ciclo di vita e dal livello di dettaglio che si vuole raggiungere nello studio. Alcuni tra i più importanti obiettivi di un’LCA sono: il paragone di due o più prodotti aventi la stessa funzione, l’identificazione di possibilità di miglioramento in futuri sviluppi di prodotti esistenti, l’individuazione di criteri di ecolabelling e la progettazione di nuove strategie aziendali (Fig. 6.3). Le finalità devono esplicitare le ipotesi, le assunzioni e i metodi che verranno utilizzati.

Nella fase iniziale è essenziale stabilire i confini del sistema, cioè i limiti entro cui bisogna svolgere la valutazione del ciclo di vita.

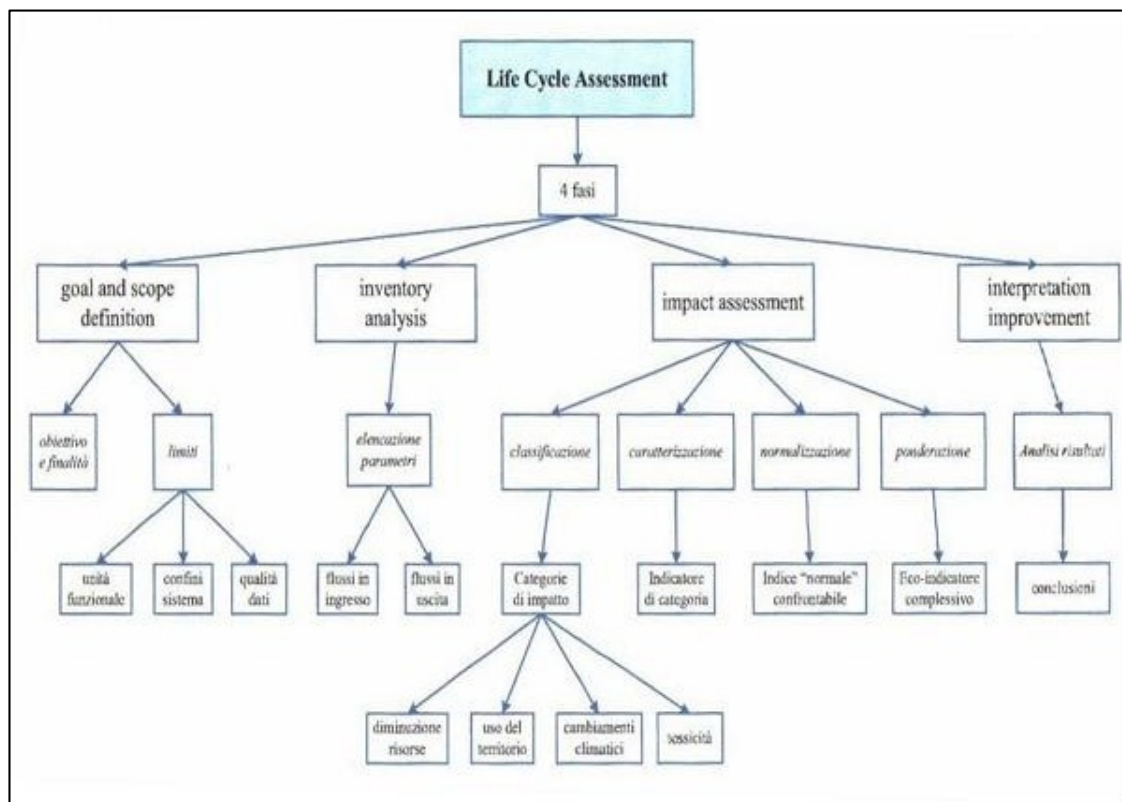


Fig. 6.3 - Schema sintetico della metodologia LCA.

A tal fine vengono definiti:

- **Unità funzionale:** è l'unità di riferimento per quantificare il rendimento di un sistema produttivo; per questo assumere una determinata unità funzionale vuol dire normalizzare – in senso matematico – il sistema in esame ad una specifica funzione. Generalmente la sua definizione è molto diretta perché bisogna solamente individuare la funzione del sistema/prodotto e calcolare tutti i flussi su questa funzione (ad esempio chilometri percorsi da un treno, livello di luminosità di una lampadina in un determinato periodo di tempo, ecc.).
- **Confini del sistema:** descrivono il sistema in esame, definendo i processi e le operazioni e individuando gli input e output da prendere in considerazione. La loro definizione è indispensabile perché l'analisi – specie quando si considerano flussi relativi ai sottoprocessi – potrebbe diventare infinita. Si tratta di un'operazione piuttosto soggettiva e molte volte si basa sulla disponibilità dei dati e/o sulla loro attendibilità e chiarezza. Il miglior modo per evidenziare i limiti del sistema è quello di disegnare un diagramma di flusso del ciclo produttivo, in modo da delineare il campo d'azione.
- **Qualità dei dati:** la qualità dei dati raccolti ed usati nella fase di inventario è propedeutica alla qualità finale dello studio LCA. E' necessario descrivere dettagliatamente la qualità dei dati per poter successivamente operare confronti fra studi su sistemi analoghi. Tale descrizione deve definire alcuni elementi quali: l'area geografica, il periodo temporale di riferimento, la

natura dei dati raccolti. Durante la raccolta, infatti, è opportuno usare un consistente numero di fonti come altre analisi LCA, banche dati internazionali o disponibili in software, queste ultime in genere presentano un elevato grado di dettaglio, dati provenienti dalla letteratura, proceedings di convegni e congressi, informazioni disponibili in internet e dati raccolti sul campo presso aziende e industrie.

Una fase particolarmente importante è quindi la redazione dell'inventario (Life Cycle Inventory – LCI): è la fase più impegnativa di un'analisi LCA. In essa vengono riportati tutti i flussi di energia e di materia del sistema/prodotto in esame normalizzati all'unità funzionale. Questi flussi sono espressi in unità fisiche (unità di massa e di energia) e comprendono l'utilizzo di risorse e di energia e tutti i rilasci in aria, in acqua e nel suolo associati al sistema. L'inventario è costituito da un cospicuo numero di voci poco interpretabili, per questo è necessaria la successiva fase di valutazione di impatto. Nella realtà pochissimi processi industriali producono un singolo flusso in uscita o si basano su una linearità fra materie prime in ingresso ed entità in uscita. Di sistemi che svolgono funzioni multiple si possono verificare tre casi:

- 1) sistemi “multi-output”, cioè sistemi di produzione a merci congiunte;
- 2) sistemi “multi-input”, è il caso ad esempio di un inceneritore che ha differenti flussi in ingresso (le varie frazioni merceologiche);
- 3) sistemi di riciclaggio a cascata, dove un rifiuto prodotto da un sistema è utilizzato come materia prima in un altro sistema.

Si presenta, quindi, il problema della ripartizione delle risorse impiegate e dei carichi inquinanti tra le diverse merci utili prodotte. La ripartizione degli input e degli output nei sistemi multifunzione è denominata “allocazione” (allocation o partitioning). L'operazione di allocazione consiste nell'associare i carichi materiali, energetici ed ambientali ai vari coprodotti e sottoprodotti di un processo. Dove il problema allocazione non può essere evitato o per lo meno minimizzato, le norme ISO 14040:2006 e 14044:2006 ne stabiliscono la risoluzione. Nelle procedure di risoluzione bisogna ripartire i consumi di materie prime, di energia e di acqua e le emissioni inquinanti rispetto o alle quantità dei prodotti fabbricati, o ai loro rapporti stechiometrici o ai loro prezzi di mercato. L'allocazione su base economica, anche se priva di significato fisico, è utile quando un prodotto non desiderato, generato in quantità uguale al prodotto principale, diminuisce notevolmente il carico ambientale del principale.

Terminata la fase della redazione dell'inventario, si passa alla fase vera e propria del LCA, che rappresenta la fase più consistente della metodologia; la sua finalità è quella di identificare le tematiche ambientali rilevanti (risorse, impatti globali, regionali e locali), associate al ciclo di vita di un sistema/prodotto. Questa valutazione possiede come matrice di base l'inventario dell'oggetto

in esame, cioè quel complesso bilancio materiale ed energetico. Infatti si passa, da un elenco di dati per nulla leggibili e comprensibili, ad una serie di informazioni che iniziano ad essere maggiormente interpretabili e quindi più utili a colui che prende decisioni di carattere ambientale e legislativo. Questi risultati di più immediata comprensione permetteranno in seguito di definire i miglioramenti ambientali da apportare al sistema dello studio.

Per tale fase le norme ISO adottano la metodologia denominata “a fase multipla”. Il metodo “a fase multipla” consiste nell’associare quantitativamente tutti i consumi delle risorse e i rilasci ambientali a determinate categorie d’impatto (eutrofizzazione delle acque, formazione di smog fotochimico, impoverimento dell’ozono stratosferico, ecc.) che sommate in base al loro peso permettono di determinare l’indicatore ambientale finale. Tale approccio si articola in quattro momenti principali:

- 1) Classificazione;
- 2) Caratterizzazione;
- 3) Normalizzazione;
- 4) Ponderazione.

Per la ISO i primi due momenti, cioè la raccolta dei risultati di indicatore per le diverse categorie d’impatto, sono obbligatori, mentre la normalizzazione e la ponderazione rappresentano elementi facoltativi da essere utilizzati in funzione dell’obiettivo e del campo di applicazione dello studio LCA.

- 1) Classificazione. Durante la classificazione si identificano le categorie d’impatto attribuendo le emissioni inquinanti e i consumi di materie prime, energia ed acqua alle specifiche categorie da essi provocati.
- 2) Caratterizzazione. Nella fase di caratterizzazione si moltiplica la quantità di una certa sostanza (informazione presente nell’inventario) per la sua relativa attitudine o incidenza a provocare quella determinata categoria d’impatto. Generalmente questa incidenza riguarda una sostanza presa a riferimento, emblematica per quella categoria. Si considerano principalmente le seguenti categorie d’impatto:
 - diminuzione delle risorse (estrazione di risorse abiotiche e biotiche);
 - cambiamenti climatici in riferimento al riscaldamento globale (effetto serra);
 - impoverimento dell’ozono stratosferico;
 - acidificazione del suolo;
 - formazione di smog fotochimico;
 - arricchimento in nutrienti (eutrofizzazione);
 - tossicità umana;

- eco-tossicità;
- uso del territorio.

Queste categorie devono essere considerate soltanto effetti ambientali potenziali, essenzialmente per due motivi: in primo luogo lo strumento LCA non svolge una determinazione puntuale delle emissioni inquinanti in un preciso istante temporale e in un preciso sito, in secondo luogo esistono ancora incertezze nelle conoscenze scientifiche relative ai meccanismi causa-effetto dell'inquinamento globale. Ciascun effetto ambientale è inoltre caratterizzato da una diversa e specifica sfera di influenza (globale, regionale o locale).

- 3) Normalizzazione. Le norme ISO definiscono tale fase nel seguente modo: *“Calcolo dell’entità dei risultati di indicatore di categoria in rapporto all’informazione di riferimento.”* Infatti, una volta quantificati i differenti indicatori, risulta ancora complesso interpretare l’effettiva grandezza delle varie categorie d’impatto, essendo espresse in unità di misura diverse. Normalizzare vuol dire allora dividere la quantità calcolata di una categoria d’impatto per la quantità totale della stessa categoria che si verifica in uno specifico arco temporale e in una determinata zona. Si ottengono così degli indici sintetici, grazie ai quali si può effettivamente comprendere a quale categoria d’impatto il sistema contribuisce maggiormente. I risultati normalizzati mostrano i problemi ambientali generati dal ciclo di vita di un prodotto secondo il loro “ordine di grandezza”. Solo con la normalizzazione si iniziano a capire le fasi ambientalmente critiche del sistema in esame o si possono iniziare ad operare confronti tra prodotti che hanno a monte tecnologie produttive differenti.
- 4) Ponderazione. La ponderazione o pesatura (weighting across impact categories) è definita dalle norme ISO nel seguente modo: *“La ponderazione è il processo di conversione dei risultati di indicatore delle diverse categorie d’impatto mediante fattori numerici basate sulle scelte dei valori. Essa può comprendere l’aggregazione dei risultati di indicatore ponderati.”* In questa fase si attribuisce un peso di importanza ai diversi effetti causati dal sistema, in modo che possano essere comparati tra loro per effettuare successivamente un’ulteriore aggregazione dei dati. Con la pesatura si determina alla fine un indice assoluto, il cosiddetto eco-indicatore, che esprime in modo complessivo le prestazioni ambientali del sistema.

L’interpretazione che è la parte conclusiva di uno studio LCA, ha lo scopo di riassumere e discutere i risultati dell’inventario e della valutazione d’impatto. Questa fase si prefigge di analizzare e riportare i risultati in modo trasparente, di giungere alle conclusioni e di spiegare le limitazioni del sistema/prodotto dello studio. Questa fase comprende i tre stadi seguenti:

- a) identificazione dei fattori ambientali significativi, sulla base dei risultati dell'inventario e della valutazione d'impatto, al fine di proporre eventuali opzioni di miglioramento;
- b) valutazioni, cioè verifica della completezza di inputs e outputs, della sensibilità e della coerenza dei risultati;
- c) conclusioni, raccomandazioni e redazione di un rapporto finale.

Infine la fase di miglioramento, completa il ciclo di analisi e permette di indirizzare il sistema verso un reale obiettivo di eco-sostenibilità, nonché di eco-efficienza. A livello organizzativo e progettuale, il miglioramento della produzione, attuato sulla base di uno studio LCA, richiede uno sforzo notevole, infatti risulta complicato scegliere tra le varie alternative applicabili al sistema o scegliere l'alternativa che massimizza l'efficienza energetico-ambientale totale.

6.2.3. Strumenti software LCA: SimaPro 6.0

Nell'ultimo decennio la rapida divulgazione della metodologia LCA è stata accompagnata dallo sviluppo di numerosi strumenti software tali da agevolare l'utente nella costruzione del modello da studiare offrendo fogli di calcolo e visualizzazioni grafiche che, evidenziando i risultati, ne facilitano l'interpretazione e le conclusioni. Anche se con caratteristiche e livelli di complessità differenti, qualsiasi software LCA ha la principale funzione di supportare l'utente nelle seguenti tre fasi di analisi:

Inventario: essendo la fase più impegnativa, un software LCA ha il vantaggio di offrire una notevole quantità di dati disponibili pertinenti a svariati settori e con ottimi livelli di qualità. Si cerca così di limitare la soggettività nella scelta delle fonti informative.

- **Analisi degli impatti:** la valutazione degli impatti viene effettuata grazie ai differenti modelli di calcolo presenti in questi strumenti. L'utente può scegliere il metodo di valutazione più appropriato al suo studio realizzando anche comparazioni tra i diversi metodi. Inoltre c'è anche la possibilità di considerare soltanto alcune categorie d'impatto oppure solo alcuni specifici stadi del ciclo di vita.
- **Interpretazione:** la fase conclusiva viene agevolata grazie al supporto di svariate visualizzazioni grafiche; inoltre alcuni software consentono anche analisi di sensibilità, simulazione di scenari alternativi ed elaborazioni statistiche dei risultati.

Essendo il mercato del settore in continua espansione, attualmente sono disponibili approssimativamente 40 software tools per analisi LCA, differenti tra loro in prestazioni e campi di applicazione.

Come già descritto, uno studio LCA comporta sin dall'inizio del lavoro la gestione di un consistente set di informazioni quantitative riferite al ciclo di vita in esame; naturalmente l'attendibilità di questi dati è propedeutica alla validità dell'intera analisi. I dati che costituiranno l'inventario possono essere distinti in tre categorie:

- 1) dati primari, provenienti da rilevazioni dirette,
- 2) dati secondari, ricavati da banche dati, studi di letteratura o da database presenti nel software,
- 3) dati terziari, provenienti da stime e da valori medi.

Per quanto possibile i dati dovrebbero essere raccolti da fonti dirette, solo così lo studio LCA potrà vantare un elevato grado di qualità. Nel caso si utilizzino informazioni ricavate da progetti simili o da fonti letterarie è necessario controllare la data di pubblicazione, operare dei confronti ed eventualmente effettuare rielaborazioni. Agli inizi degli anni '90 il rapido sviluppo di numerosi strumenti software è stato accompagnato dal difficile scambio e confronto di dati tra soggetti differenti, poiché i vari database utilizzavano metodi e formati diversi sia per la raccolta che per la rappresentazione delle informazioni. Questo problema è stato rimediato con la creazione di un formato standard per i dati LCA. Attualmente sono due i formati presenti:

- formato SPINE (Sustainable Product Information Network for the Environment), sviluppato dalla CPM (Centre for Environmental Assessment of Product and Material System) dal 1993 al 1995;
- formato SPOLD, sviluppato dalla omonima società SPOLD (Society for Promotion of Life cycle Development) dal 1994 al 1997.

Lo sviluppo di questi formati voleva standardizzare le caratteristiche dei dati per un'applicazione LCA mediante la definizione di una struttura comune che contiene, oltre all'informazione numerica del dato in sé, anche informazioni sulla fonte e sull'applicabilità ad altri studi. Entrambi i formati rispecchiano i requisiti di qualità dei dati quali la precisione, la coerenza, la rappresentatività e l'identificazione di caratteri spaziali, temporali e tecnologici. Il formato SPOLD si distingue però per una maggiore complessità e un più alto dettaglio delle informazioni richieste, risulta quindi fruibile soprattutto da esperti di LCA a causa di un linguaggio più tecnico del formato SPINE. Si riporta di seguito un elenco di alcuni tra i principali database disponibili per un Life Cycle Inventory (fase di inventario).

Tra i software più utilizzati, adottato anche per la presente attività di ricerca, vi è il **SimaPro 6.0**. Il software SimaPro, distribuito dalla Pre' Product Ecology Consultants, è uno strumento molto affidabile perché, grazie ad una spiccata potenzialità interattiva, offre la possibilità di creare, modificare e adattare specifici processi a quelli già esistenti nel database. Rispettando fedelmente

le quattro macrofasi della metodologia fornite dalle ISO 14040 e 14044, il software è stato costruito intrecciando in modo elementare e agevole i tre campi d'indagine alla base della LCA (Fig. 6.4).

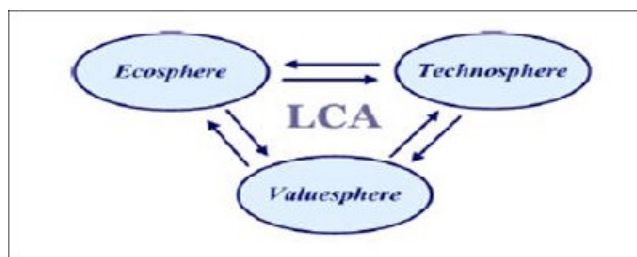


Fig. 6.4 - Campi d'indagine alla base della metodologia LCA

I processi sono separati in sette categorie, che a loro volta sono ulteriormente divise in sottocategorie:

- 1) materiali;
- 2) energia;
- 3) trasporto;
- 4) processi in corso;
- 5) uso;
- 6) scenari rifiuto;
- 7) trattamento rifiuto.

In funzione dei confini del sistema (geografici, tecnologici, temporali), degli obiettivi e degli indici di rappresentatività definiti nella prima fase dell'analisi, ogni processo contenuto nel software mostra i suoi rispettivi indici di qualità dei dati rendendo la scelta più veloce da parte dell'utente. E' possibile sia utilizzare i processi presenti nelle librerie e adattarli alla specifica analisi, sia crearne immediatamente nuovi secondo il diagramma di flusso del sistema globale da sottoporre a LCA.

La fase dell'inventario riguarda le fasi del prodotto e in essa è possibile effettuare operazioni di assemblaggio, andando a richiamare tutti i processi precedentemente creati, di ciclo di vita, inserendo anche gli scenari di smaltimento, o ancora scenari di disassemblaggio, smontaggio e riuso. E' immediata la creazione di diagrammi ad albero che, collegando tutti i determinati processi, visualizzano gli assemblaggi o i cicli di vita. Scelto il metodo di valutazione d'impatto, il profilo di valutazione calcola velocemente i risultati mostrando grafici di caratterizzazione, normalizzazione e pesatura e offrendo, così, un'immediata interpretazione visiva.

Le principali librerie presenti nel database standard del SimaPro sono:

- Ecoinvent
- Japanese Input Output database

- US Input Output database
- Danish Input Output database
- Dutch Input Output database
- Industry data
- LCA food database
- ETH-ESU 96
- BUWAL 250
- IDEMAT 2001
- Franklin US LCI database
- Data archive
- IVAM database

Per la realizzazione dell’LCA della presente ricerca sono stati utilizzati i database ETH-ESU e BUWAL 250.

In linea di massima, anche se esistono differenze tra i vari metodi, la valutazione degli impatti riflette le fasi definite dalle ISO 14040 e 14044. E’ doveroso precisare che, sebbene la normalizzazione è definita come un’operazione che divide il risultato per un fattore “normale”, il SimaPro utilizza un valore moltiplicativo. I metodi di valutazione d’impatto presenti nel software sono numerosi, tuttavia quelli utilizzati nell’ambito della presente ricerca sono:

- Eco-Indicator 99
- EDIP/UMIP
- Cumulative Energy Demand

6.3. LCA applicato ad Ambra Ambiente

6.3.1. Analisi dell’inventario, degli impatti e interpretazione

La redazione dell’inventario, fase estremamente delicata dello studio, è stata realizzata raccogliendo sul campo le informazioni relative al sistema esaminato e utilizzando le librerie del software per i processi relativi ai singoli materiali, all’energia e ai combustibili. Si presentano di seguito, distinte per le differenti fasi, le informazioni raccolte presso l’azienda Ambra Ambiente, che vengono normalizzate all’unità funzionale.

Stallonatura

Per la fase di stallonatura è stato considerato che 1 Unità Funzionale (1000 kg) di pneumatici autocarro in entrata genera, in un’ora, 945 kg di pneumatici senza tallone + 55 kg di acciaio. La

potenza della stallonatura è di 9 kWh (potenza installata = 18 HP \cdot 0,74 = 13,32 kW, considerando la potenza reale assorbita è circa il 70% di quella installata, ne consegue che è pari circa a 9 kWh). L'acciaio sarà portato in una struttura esterna dove verrà riciclato.

Potenza	9 kWh
Input	1 t/h PFU
Output	945 kg/h PFU gomma
Lubrificante olio idraulico	0,015 l/h

Triturazione

Nella fase di triturazione, con una potenza di 20 kWh, 1000 kg di pneumatici senza tallone vengono trasformati in 1000 kg di pneumatici triturati (ciabattato).

Potenza	20 kWh
Input	1 t di PFU senza tallone
Output	1 t di PFU triturato

Prima granulazione (20 mm)

Nella prima granulazione 1000 kg di triturato in un'ora diventano 680 kg di granulo di gomma da 20 mm + 320 kg di paglia di ferro ad una potenza di 60 kWh. (N.B. come si evidenzia, ogni 100 kg di pneumatici autocarro, 2/3 diventano polverino o granulo ed 1/3 è ferro che viene riciclato in fonderia. I pneumatici vettura, che contengono anche materiali tessili, vengono generalmente destinati alla combustione nei cementifici o utilizzati come materiale tecnico in discariche, dopo semplice triturazione senza stallonatura).

Potenza	60 kWh
Produzione oraria	1 t/h
Output	680 kg/h gomma + 320 kg/h ferro
Lubrificanti	0,2 l/h
Acqua	0,15 mc/h

Seconda granulazione (4 mm)

In questa fase da 350 kg di granulo da 20 mm vengono prodotti 350 kg di granulo da 4 mm in un'ora ad una potenza di 60 kWh. Saranno usati per materiali fono/termoisolanti:

Potenza	60 kWh
Input	350 kg/h di granulo da 20 mm
Output	350 kg/h di granulo da 4 mm
Lubrificanti	0,2 l/h

Seconda granulazione bis (2 mm)

Nella seconda granulazione bis, da 250 kg di granulo da 20 mm vengono prodotti 250 kg di granulo 2 mm, in un'ora, alla potenza di 60 kW:

Potenza	60 kWh
Input	250 kg/h di granulo da 20 mm
Output	250 kg/h di granulo da 2 mm
Lubrificanti olio per bronzine	0,2 l/h

Polverizzazione (0,420 mm)

Il granulo da 20 mm darà, in un'ora, alla potenza di 250 kWh, 600 kg di polverino per mescole per pneumatici, articoli tecnici, bitumi metodo wet:

Potenza	250 kWh
Input	600 kg/h granulato 20 mm
Output	600 kg/h polverino
Lubrificanti	0,05 kg/h

Impacchettatrice

In questa ultima fase, 20 kg di granulato o polverino vengono impacchettati in sacchetti di polietilene; ogni sacchetto pesa 0,1 kg. Per una tonnellata di polvere avremo i seguenti valori:

Potenza/Elettricità	6,667 kW
Input	1 t/h di polverino
Output	1 t di polverino in sacchetti da 20kg

Movimentazione

muletti

Infine sono stati considerati i trasporti all'interno dell'Azienda:

Heat diesel	70,97 MJ
Olio lubrificante	0,025 kg
Olio motore	0,0786 kg

Successivamente alla raccolta dati di inventario per tutto il processo di recupero dei PFU ed alla relativa normalizzazione all'unità funzionale, si passa alla fase vera e propria della valutazione di impatto ambientale ovvero al Life Cycle Impact Assessment (LCIA). Questa fase è stata condotta impiegando il software SimaPro Versione 6.0. In particolare sono stati usati tre diversi metodi di valutazione: Eco-Indicator 99, EDIP/UMIP e Cumulative Energy Demand precedentemente descritti. I grafici di valutazione degli impatti (output del software SimaPro) comprendono solo la fase di caratterizzazione poiché è l'unica oggettiva e obbligatoria in un'analisi LCA; le fasi di

normalizzazione e ponderazione dipendono dai pesi attribuiti da chi svolge lo studio, sono perciò soggettive e facoltative.

Con il software SimaPro sono stati eseguiti due calcoli dell’LCA: il primo riguarda la valutazione degli impatti generati dal processo di recupero di PFU nell’Azienda Ambra Ambiente, il secondo riguarda il confronto tra questi e il sistema che comprende il riciclo.

6.3.2. LCIA di Ambra Ambiente

Il Life Cycle Impact Assessment (LCIA) relativo all’azienda Ambra Ambiente è stato effettuato, come già precedentemente accennato, con 3 metodi:

- 1) Eco-Indicator 99;
- 2) EDIP/UMIP;
- 3) Cumulative Energy Demand

Metodo Eco-Indicator 99

Tale metodo consente di valutare i danni alla salute umana (human health), alla qualità degli ecosistemi (ecosystem quality) e il consumo di risorse (resources). Queste tre categorie d’impatto sono definite “macro categorie”. All’interno di esse vengono anche considerate delle sotto categorie: le “singole categorie”. Quest’ultime sono:

- 1) Human health:
 - Carcinogens: sostanze cancerogene
 - Respiratory effects (organics):effetti sulla respirazione dovuti a sostanze organiche
 - Respiratory effects (inorganics): effetti sulla respirazione dovuti a sostanze inorganiche
 - Climate changes: effetto serra
 - Radiation: radiazioni ionizzanti
 - Ozone layer: impoverimento dell’ozono stratosferico
- 2) Ecosystem quality:
 - Ecotoxicity: ecotossicità
 - Acidification/Eutrophication: acidificazione/eutrofizzazione
 - Land use: uso del territorio
- 3) Resources:
 - Minerals: consumo di sostanze minerali
 - Fossil fuels: consumo di combustibili fossili

Applicando quindi il software indicato vengono di seguito riportati i risultati ottenuti in Fig. 6.5, Fig. 6.6 e Fig. 6.7.

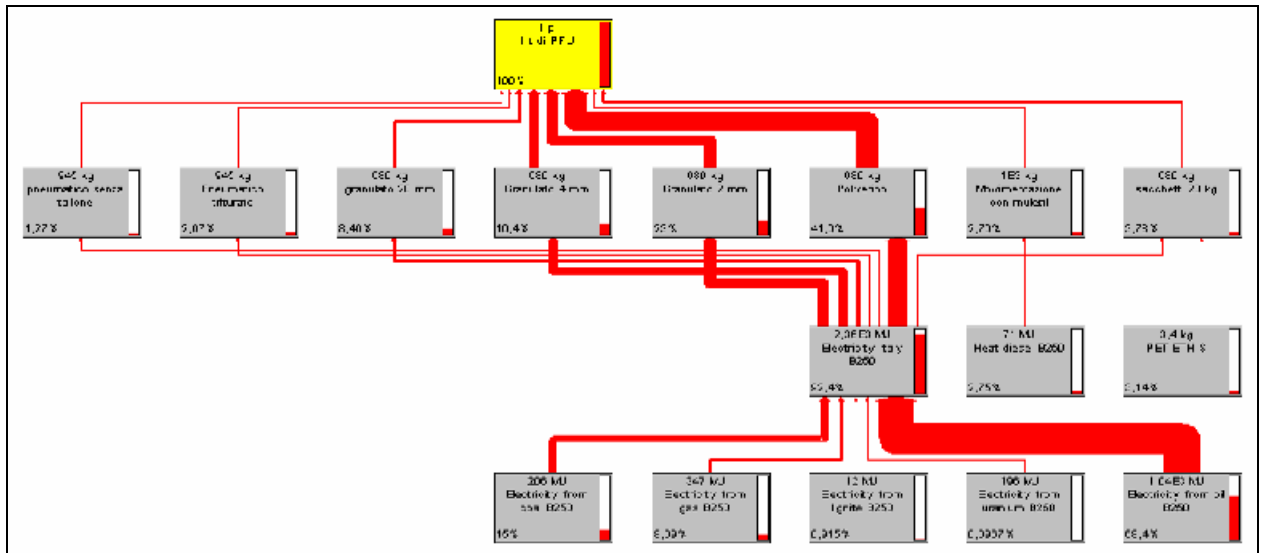


Fig. 6.5 - Diagramma di flusso Eco-Indicator human health

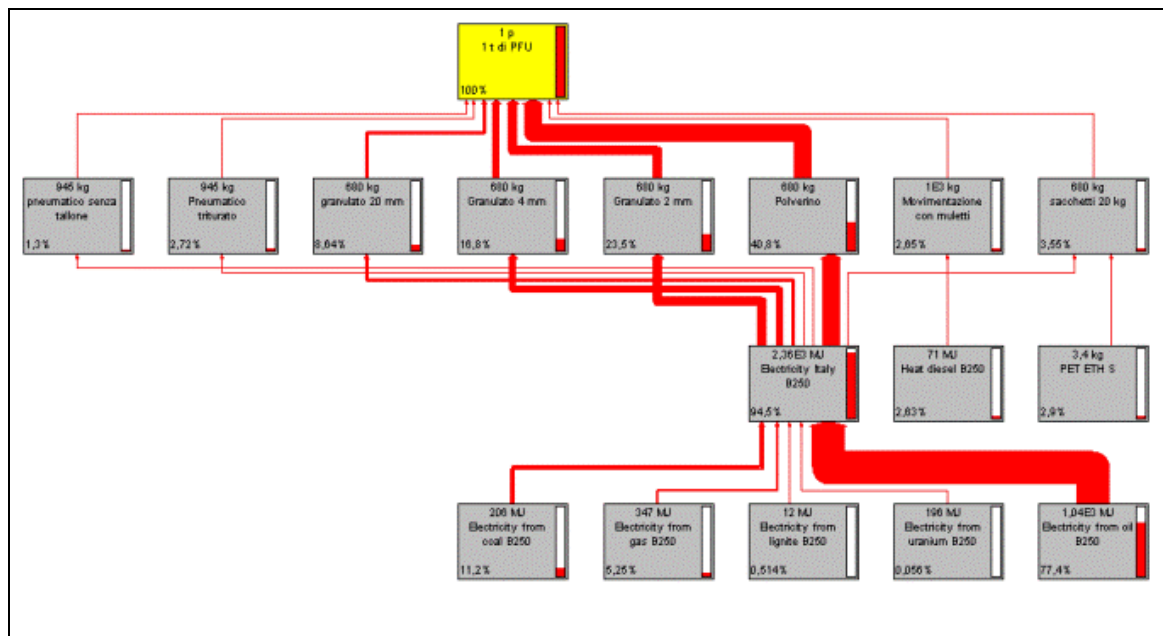


Fig. 6.6 - Diagramma di flusso Eco-Indicator ecosystem quality

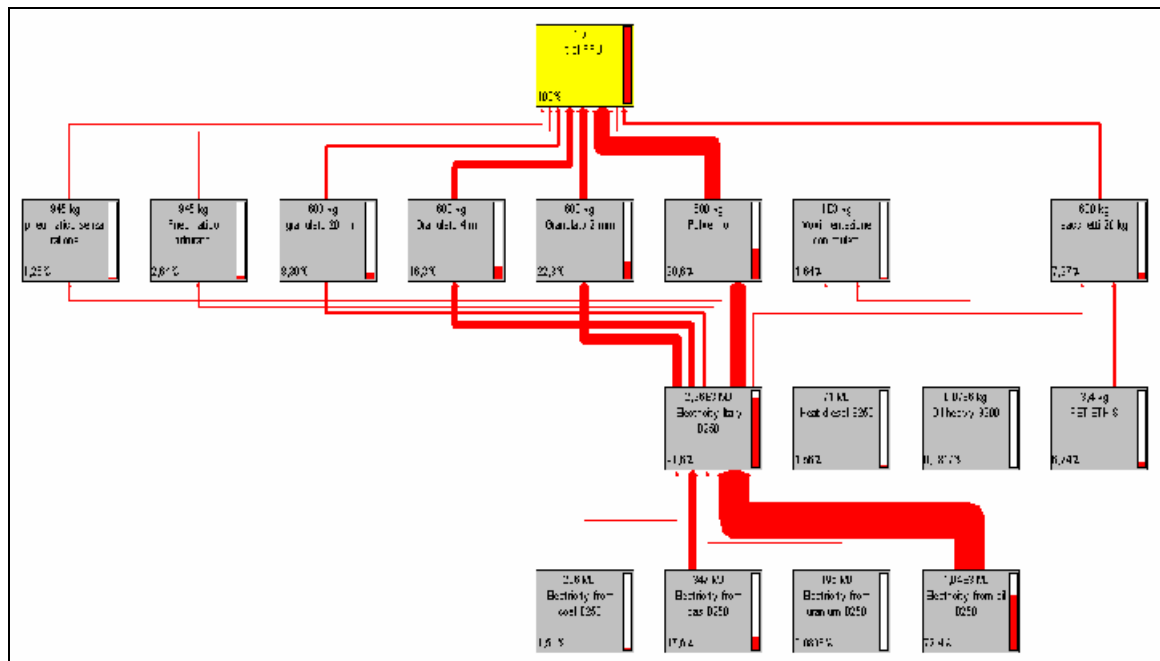


Fig. 6.7- Diagramma di flusso Eco-indicator resources

Nei grafici di valutazione dei danni si può osservare che la fase di lavorazione che genera maggiori impatti ambientali in tutte le categorie è la polverizzazione; questo si nota anche dai diagrammi di flusso, infatti la freccia corrispondente a questa fase ha uno spessore maggiore. All'interno della categoria Human health la singola categoria con il maggiore impatto è Respiratory effects inorganics con 0,00012 DALY. In Ecosystem quality è Ecotoxicity a ricevere i maggiori danni: 6,11 PDF*m2yr (Grafico 6.1).

Infine in Resources è Fossil fuels con 277 MJ surplus (Grafico 6.2); questo perché viene consumata energia elettrica, e questa deriva, nel mix energetico considerato, per la maggior parte da combustibili fossili. Questi valori corrispondono alla fase di polverizzazione; seguono poi la fase di granulazione a 2 mm, quella di granulazione a 4 mm, quella di granulazione a 20 mm; le restanti fasi hanno impatti minori.

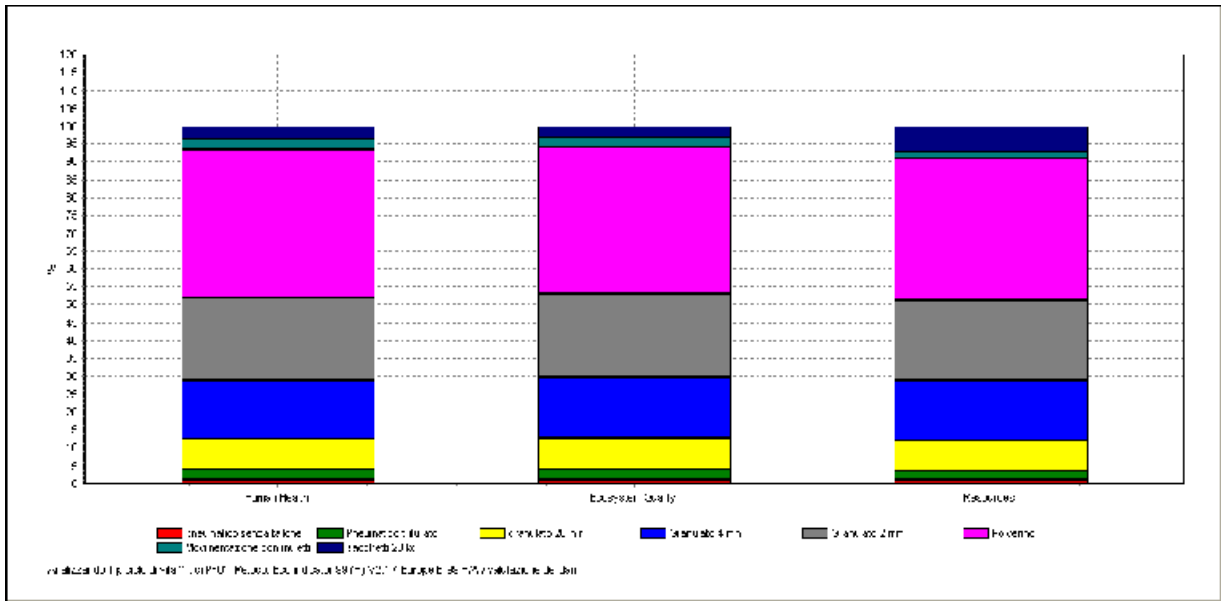


Grafico 6.1 -Valutazione dei danni con il metodo Eco-Indicator, macro categorie

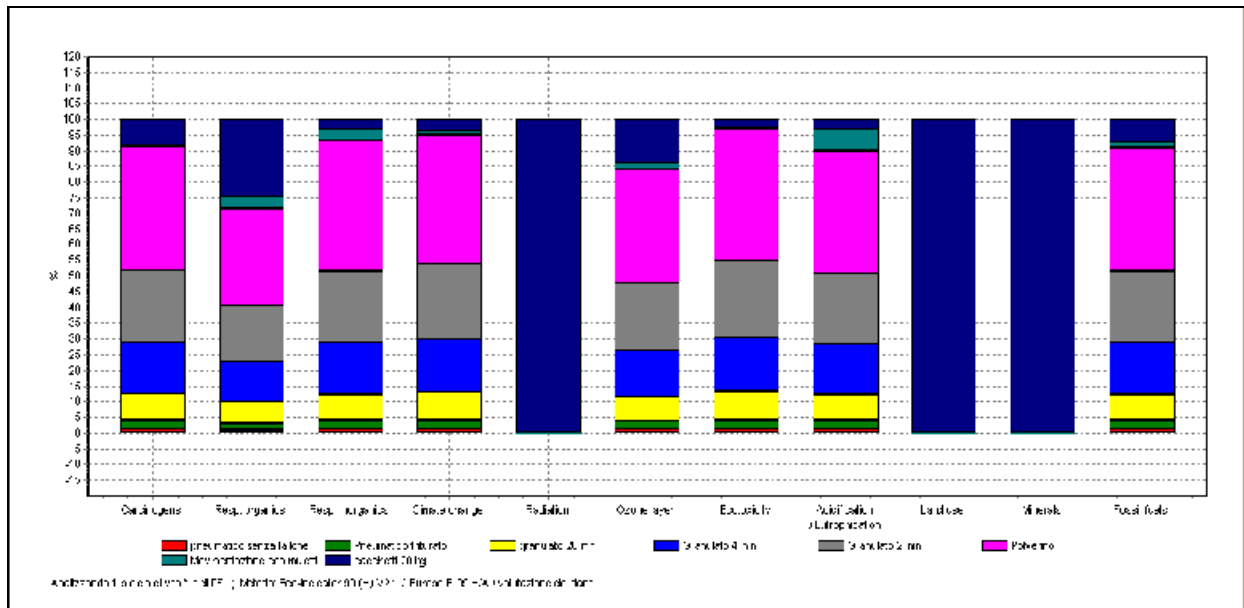


Grafico 6.2 - Valutazione dei danni con il metodo Eco-Indicator, singole categorie.

Metodo EDIP/UMIP

Questo metodo di valutazione comprende vari indicatori; in Fig. 6.8 è stato scelto quello del GWP, che considera le emissioni di CO2.

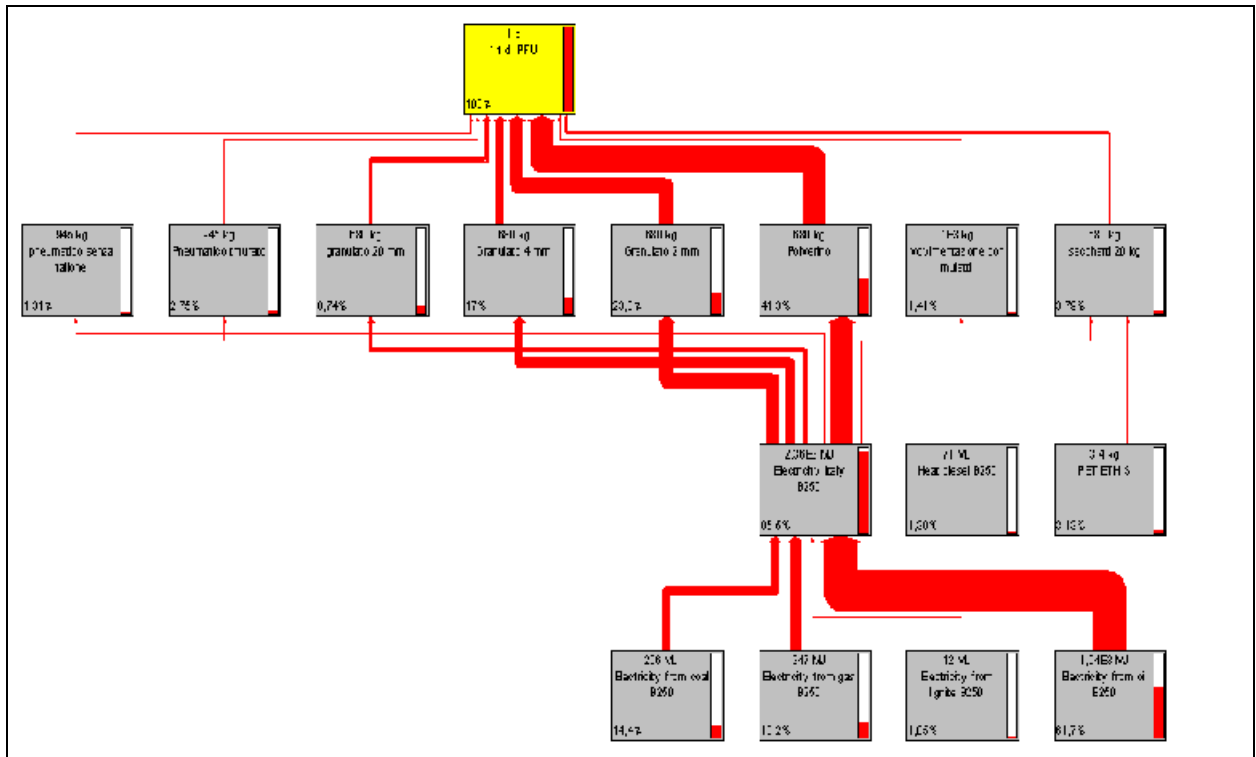


Fig. 6.8 - Diagramma di flusso GWP

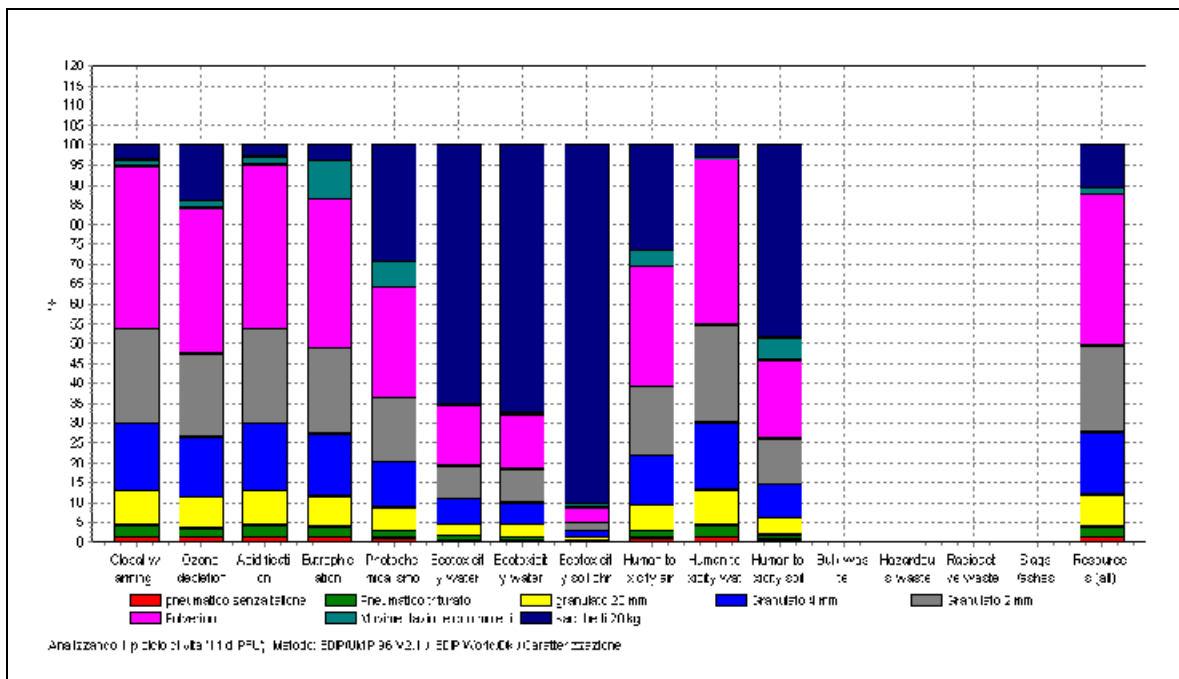


Grafico 6.3 -Caratterizzazione con il metodo EDIP/UMIP

Nel Grafico 6.3 è possibile osservare che le categorie di impatto, oltre al Global warming (GWP) sono le seguenti:

- Ozone depletion
- Acidification

- Eutrophication
- Photochemical smog
- Ecotoxicity water chronic
- Human toxicity air
- Human toxicity water
- Human toxicity soil
- Bulk waste
- Radioactive waste
- Slags/ashes
- Resources (all)

Anche con questo metodo di valutazione la fase che maggiormente incide risulta essere la polverizzazione.

Nella categoria Global warming (GWP 100) il valore è 178000 g CO₂, segue la granulazione a 2 mm con 102000 g CO₂ e la granulazione a 4 mm con 73100 g CO₂.

Nella categoria Human toxicity il valore della polverizzazione è 20400000 m³, quello della granulazione a 2 mm è 11800000 m³ e quello della granulazione a 4 mm è 8410000 m³.

Metodo Cumulative Energy Demand

Questo metodo valuta i consumi energetici e i diversi tipi di energia utilizzata. Nel nostro caso, come già detto, la maggior parte dell'energia usata è elettrica ed è generata da combustibili fossili. L'unità di misura è il MJ equivalente. In Fig. 6.9 è riportato il diagramma di flusso di energia che emerge dall'analisi.

Nel Grafico 6.4 sono confrontate le fasi del processo di trattamento e recupero di PFU e risulta evidente che la maggior quantità di energia è impiegata nella fase di polverizzazione (2878 MJ-eq), segue la granulazione a 2 mm (1653 MJ-eq), la granulazione a 4 mm (1185 MJ-eq), la granulazione a 20 mm, l'impacchettatura, la triturazione, la stallonatura e la movimentazione con muletti. Il valore dell'energia totale è 7132 MJ-eq.

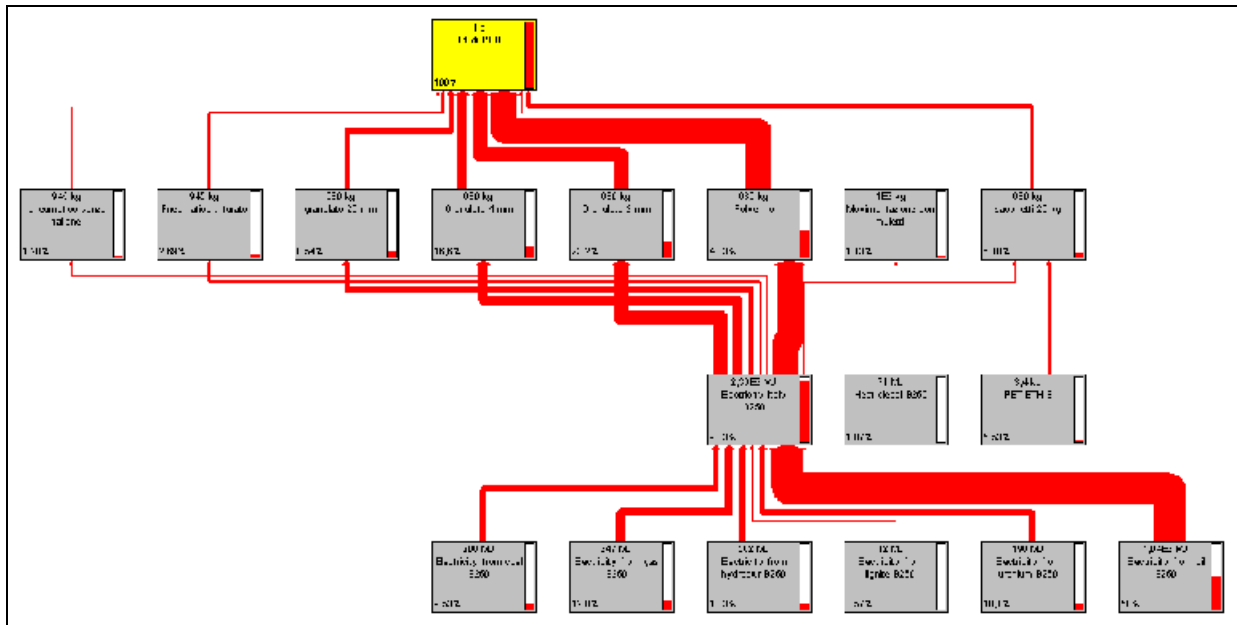


Fig. 6.9 - Diagramma di flusso energia

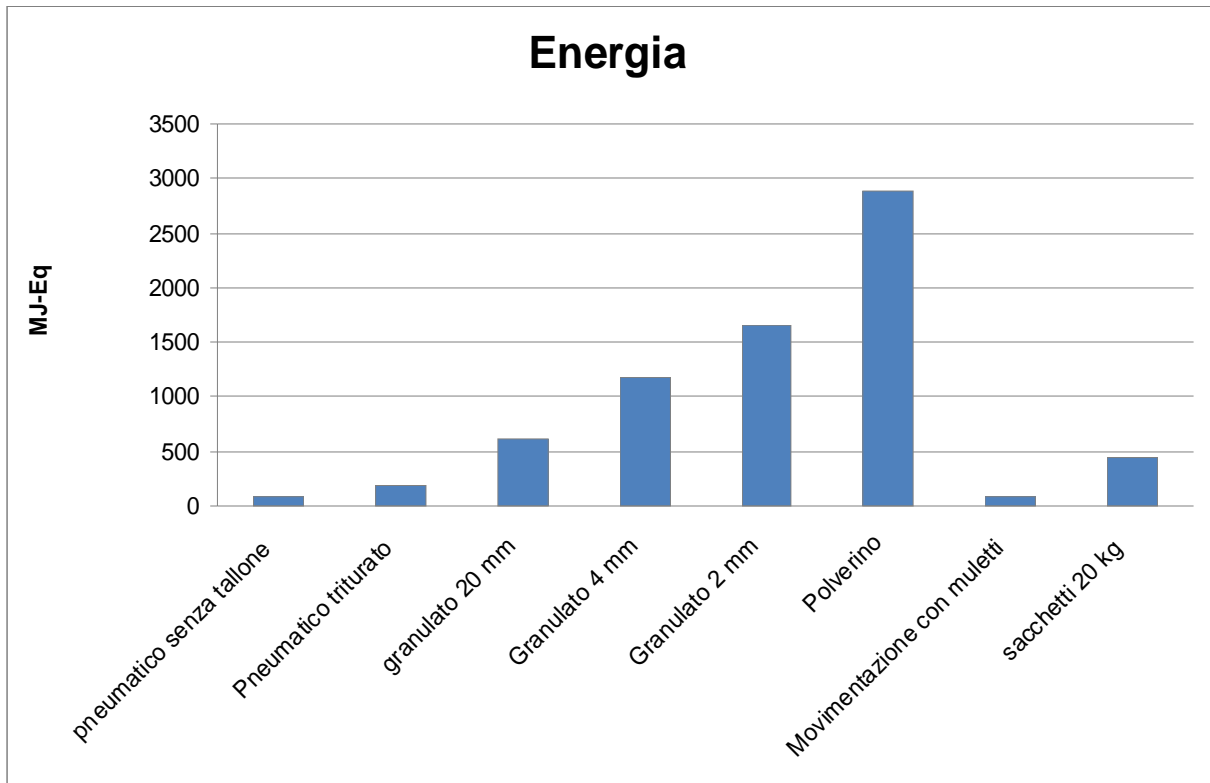


Grafico 6.4 - Diagramma energia totale

6.3.3. LCIA di Ambra Ambiente con recupero di materiali

In questo paragrafo si confrontano gli impatti generati dal processo produttivo di Ambra Ambiente con quelli che comprendono anche il riciclo di acciaio e ferro; questo allo scopo di mostrare non solo gli impatti ma anche i benefici ambientali del trattamento e recupero di PFU. Nei diagrammi di flusso sotto riportati le frecce rosse indicano danni all'ambiente mentre quelle verdi indicano benefici. Gli scarti della stallonatura (acciaio) e della prima granulazione (ferro) sono trasportati dallo stabilimento Ambra Ambiente al luogo in cui saranno riciclati per una distanza che supponiamo sia 40 km, con un autocarro (Truck 40t). Anche in questo caso il Life Cycle Impact Assessment (LCIA) è stato effettuato con 3 metodi:

- 1) Eco-Indicator 99;
- 2) EDIP/UMIP;
- 3) Cumulative Energy Demand

Metodo Eco-Indicator 99

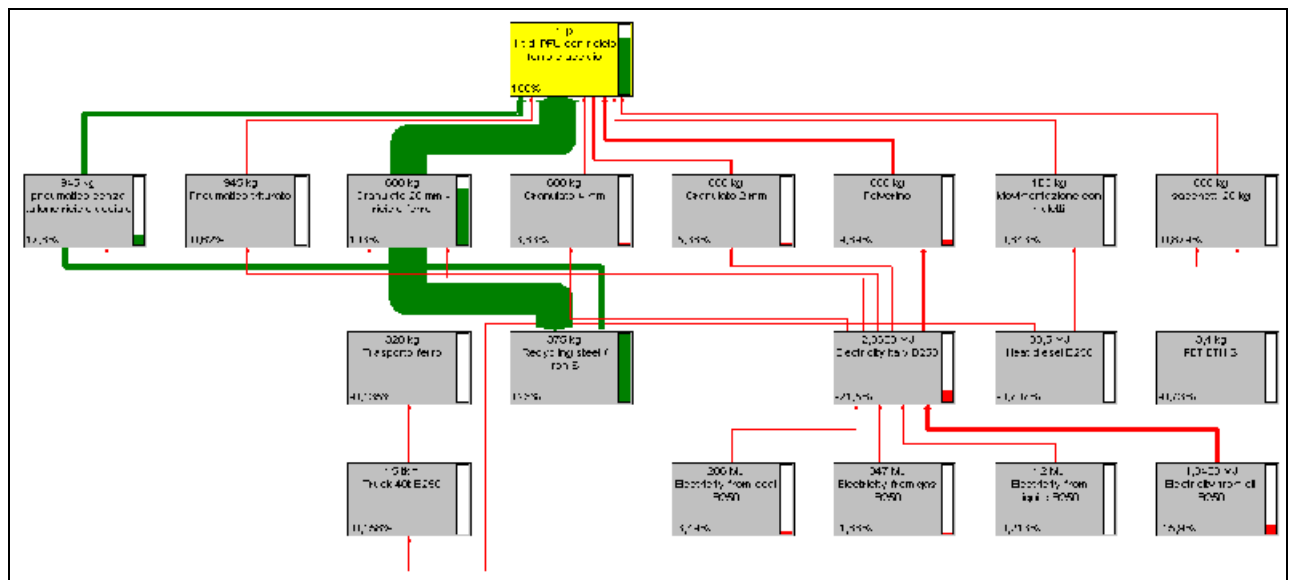


Fig. 6.10 - Diagramma di flusso Eco-Indicator human health con riciclo

Dall'analisi svolta (Fig. 6.10, Fig. 6.11 e Grafico 6.5, Grafico 6.6) i grafici di confronto emerge che, riciclando acciaio e ferro, il risparmio è notevole. Nella macro categoria Human health il valore senza riciclo è 0,000401, con il riciclo è -0,00172 DALY; in Ecosystem quality si passa da 23,4 a -3,26 PDF*m2yr e in Resources da 700 a 576 MJ-eq. Nelle singole categorie osserviamo, ad esempio, che in Respiratory effects inorganics si passa da 0,00945 a - 0,000663 DALY e in Acidification/eutrophication da 563 a 4,87 PDF*m2yr.

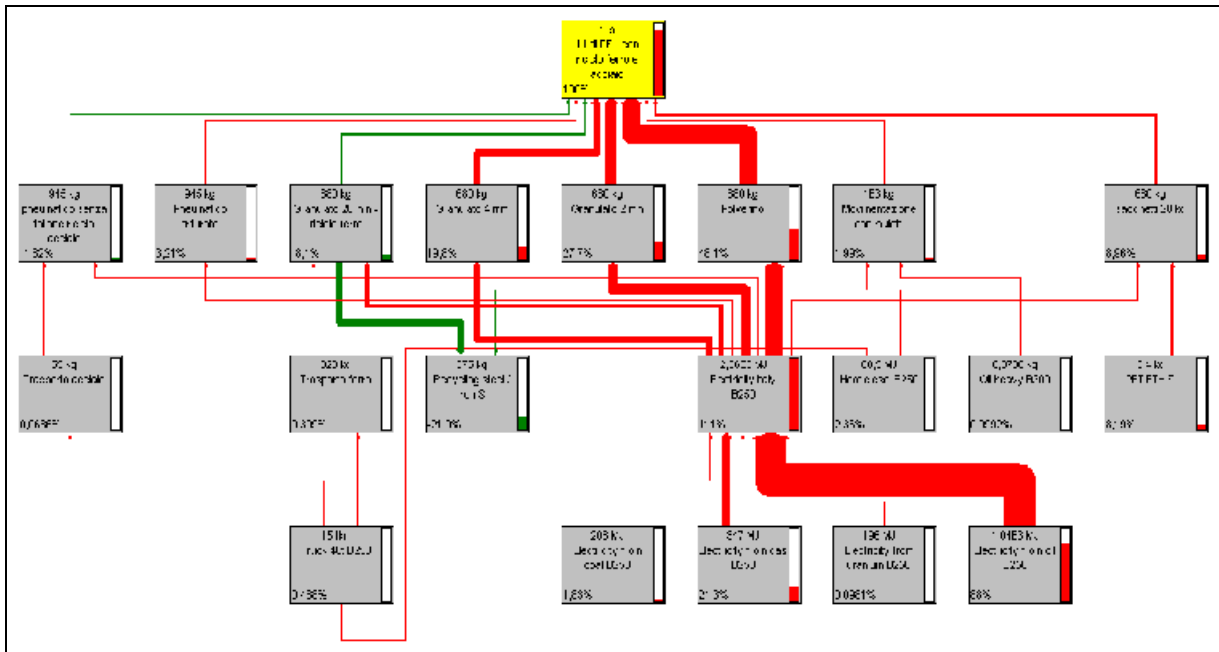


Fig. 6.11 - Diagramma di flusso Eco-Indicator resources con riciclo

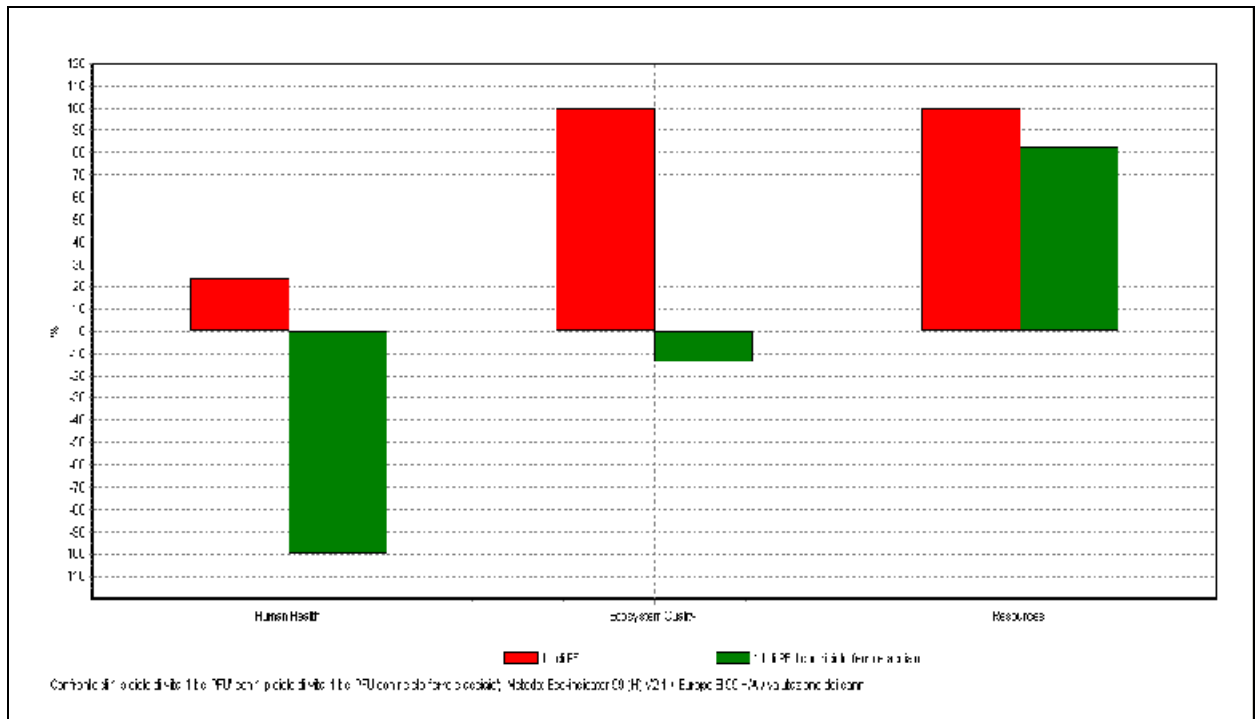


Grafico 6.5 - Valutazione dei danni delle macrocategorie del confronto tra i due LCA con il metodo Eco-Indicator

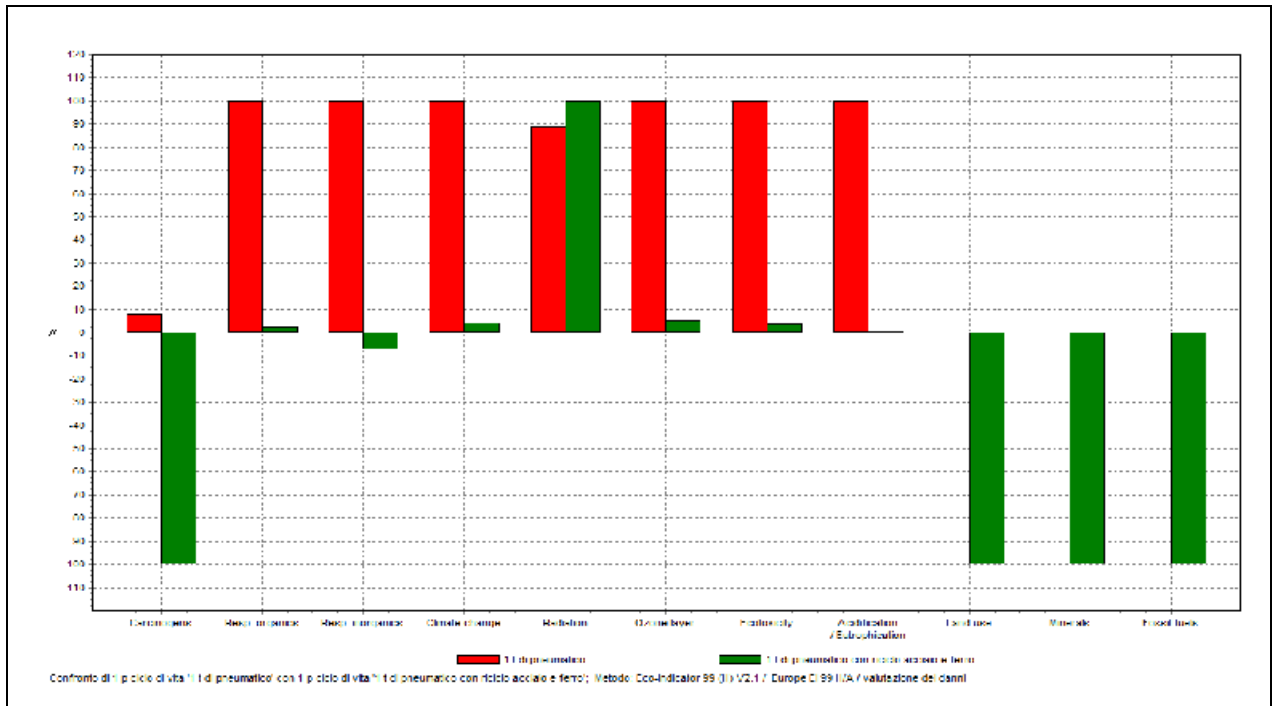


Grafico 6.6 - Valutazione dei danni delle singole categorie del confronto tra i due LCA con il metodo Eco-Indicator

Metodo EDIP/UMIP

Anche nel seguente confronto si considerano le categorie elencate precedentemente ed in particolare si può notare che i valori della categoria Global warming passano da 430000 g CO₂ senza riciclo a 246000 g CO₂ con il riciclo (Fig. 6.12 e Grafico 6.7).

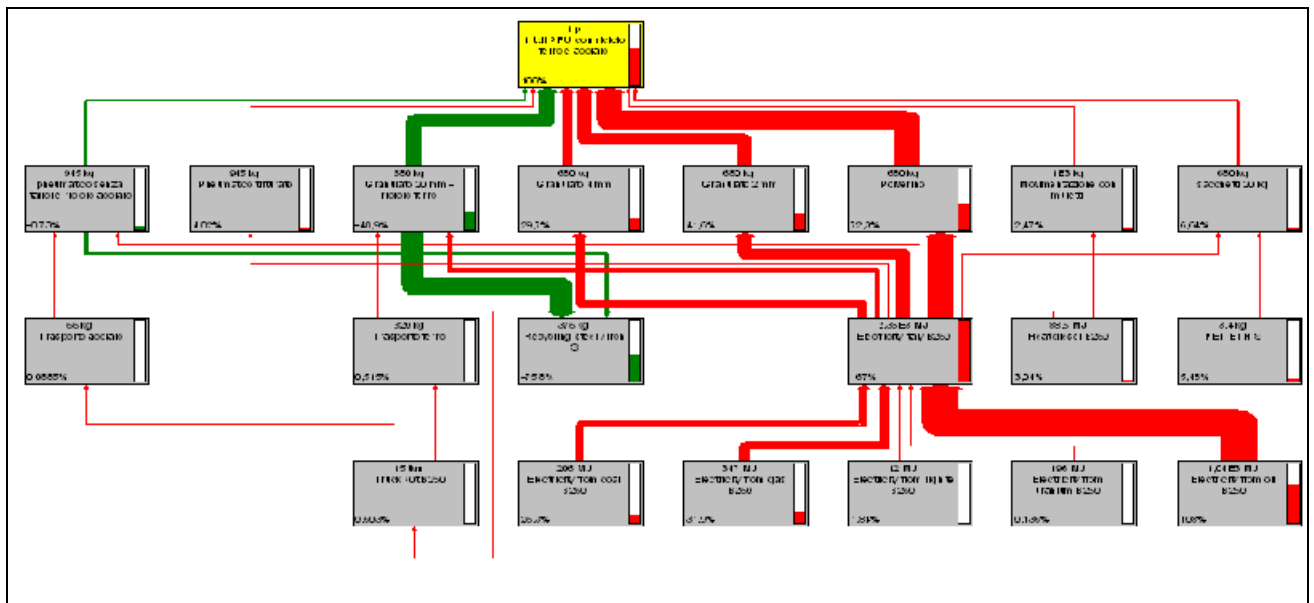


Fig. 6.12 - Diagramma di flusso GWP con riciclo.

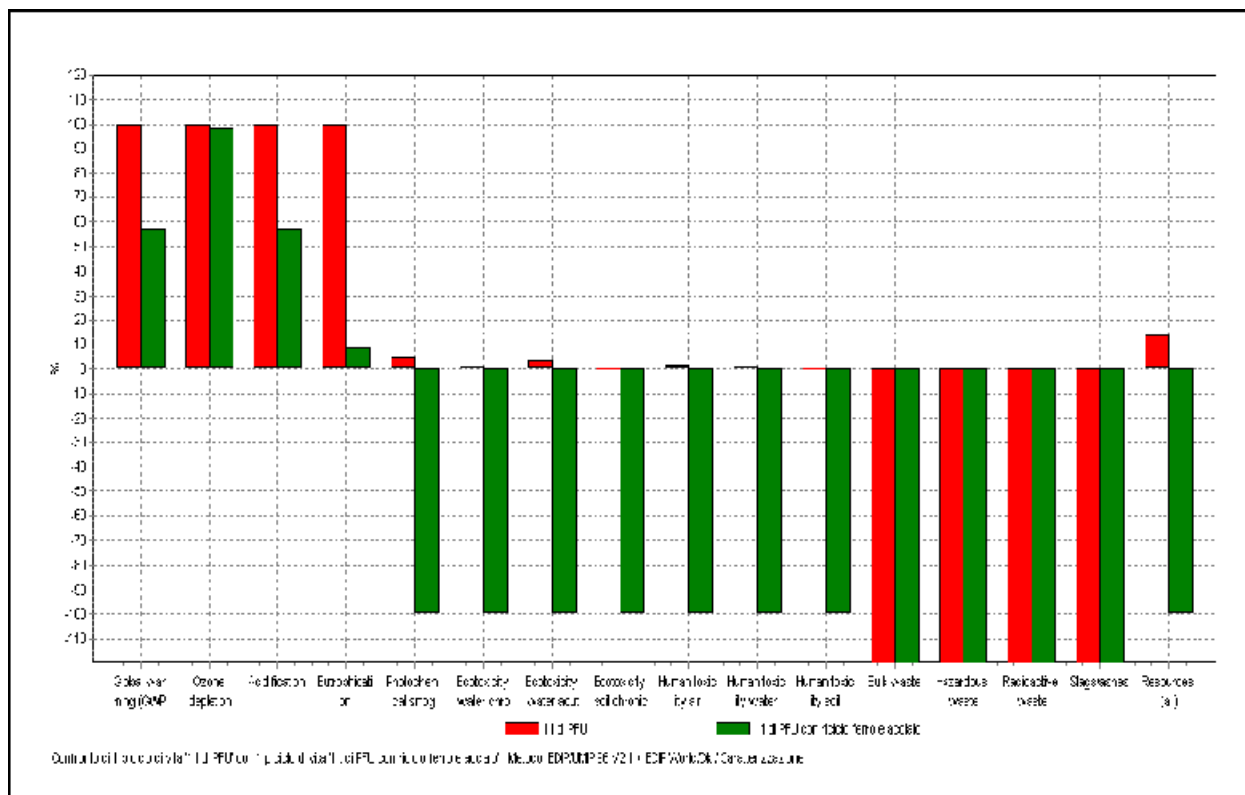


Grafico 6.7 - Caratterizzazione con il metodo EDIP/UMIP, confronto tra i due LCA.

Metodo Cumulative Energy Demand

Osservando la Fig. 6.13 e il Grafico 6.8 è possibile notare che il risparmio di energia nel ciclo di vita con il riciclo rispetto all'altro; nel ciclo di vita senza riciclo sono consumati 7132 MJ-eq. mentre in quello con il riciclo solo 3856 MJ-eq.

Si riportano inoltre i valori, con e senza riciclo, delle fasi di stallonatura e prima granulazione, per vedere la riduzione degli impatti dei singoli ricicli. Il valore della fase di stallonatura senza riciclo è 91,4 MJ-eq, con il riciclo dell'acciaio è -389,792 MJ-eq. Il valore della prima granulazione senza riciclo è 609,2 MJ-eq, con il riciclo di ferro è -2190,71 MJ-eq.

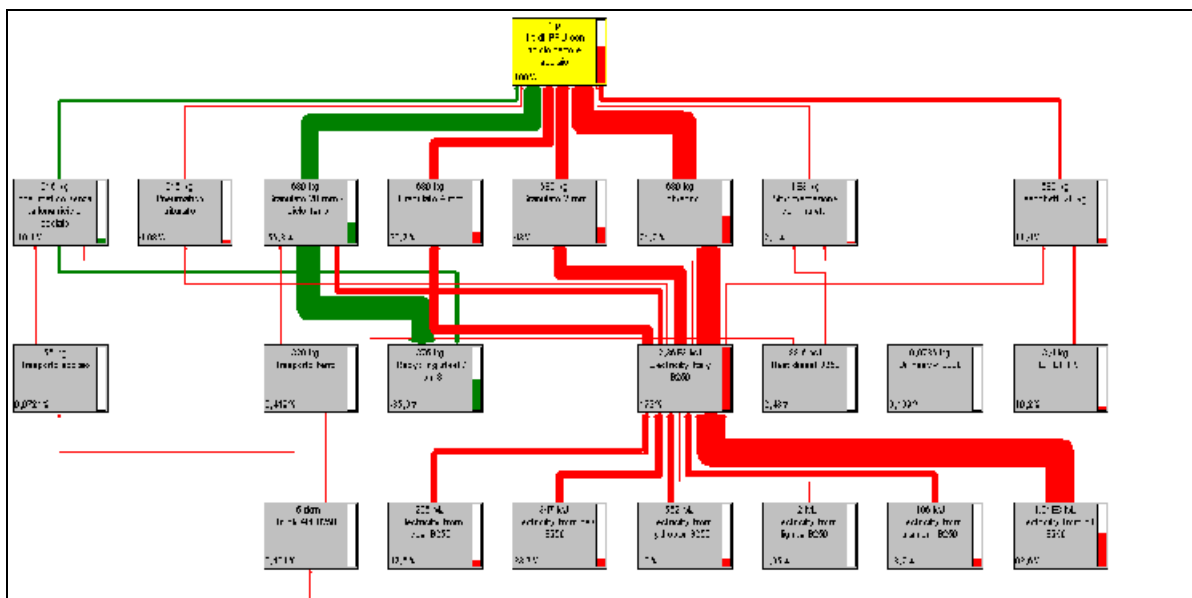


Fig. 6.13 - Diagramma di flusso Energia con riciclo.

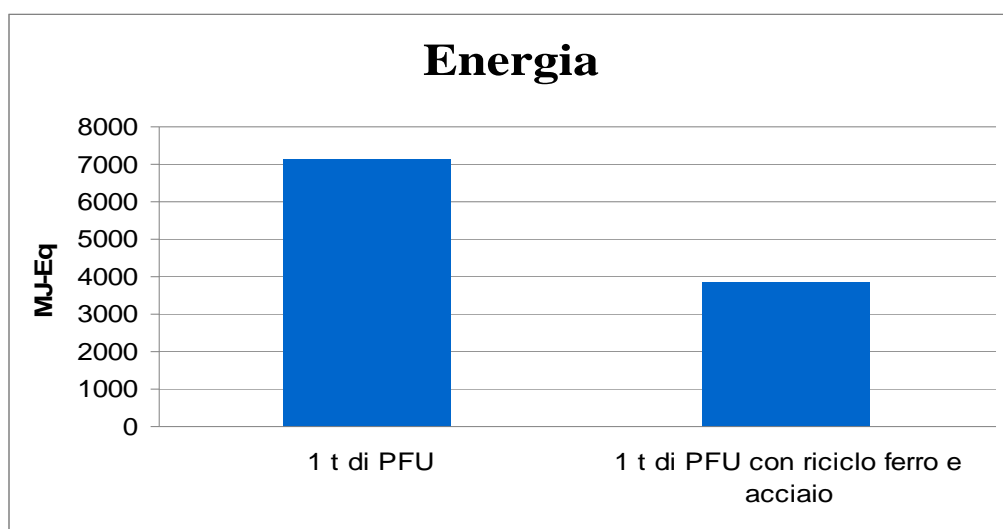


Grafico 6.8 - Energia totale, confronto con e senza recupero materiali

6.4. Conclusioni

Al fine di valutare l'attività di recupero del PFU, svolta dall'azienda Ambra Ambiente, è stato applicato il metodo Life Cycle Assessment (LCA) quale valido strumento riconosciuto in ambito internazionale. L'analisi è stata realizzata considerando innanzitutto il processo di trattamento e recupero dei PFU e comprende le fasi di stallonatura, triturazione, tre tipi di granulazione e polverizzazione. La parte più importante e complessa di tale analisi è rappresentata dalla raccolta e il trattamento dei dati, quindi la fase di inventario. Il software utilizzato è il SimaPro 6.0, che si è dimostrato uno strumento efficiente nel fornire i risultati dell'analisi degli impatti. La valutazione dell'impatto ambientale del trattamento e recupero di 1t di PFU è stata realizzata

impiegando tre diversi metodi: Eco-Indicator 99, EDIP/UMIP e Cumulative Energy Demand. E' stato eseguito un primo LCA del solo processo di trattamento e recupero presso Ambra Ambiente, poi un LCA che tiene conto anche del recupero dell'acciaio, scarto della fase di stallonatura e, del ferro, scarto della fase di prima granulazione (a 20 mm), quindi il confronto tra le due. I risultati dell'analisi degli impatti mostrano che la fase maggiormente impattante è la polverizzazione e, secondariamente, la granulazione a 2 mm. E' emerso inoltre che riciclando acciaio e ferro sono in parte compensati i carichi ambientali generati dal processo studiato.

CONCLUSIONI

Obiettivo della presente attività di ricerca è stato quello di valorizzare, attraverso idonee forme di riutilizzo e recupero, i pneumatici fuori uso (PFU) al fine di realizzare prodotti tecnici innovativi a basso impatto ambientale. In particolare sono stati studiati e approfonditi i seguenti settori: bitumi modificati con PFU, pannelli fonoisolanti per edilizia, campi da calcio/ rugby in erba sintetica. In aggiunta è stato applicato il metodo LCA (Life Cycle Assessment) per la valutazione del ciclo di vita dei materiali prodotti dall'attività di recupero del PFU svolta dall'azienda Ambra Ambiente (Cotignola di Ravenna).

Per quanto attiene i bitumi modificati sono state prodotte diverse mescole, ottenute con l'aggiunta di polverino derivante da PFU, in diversa percentuale. Specifiche prove di laboratorio hanno quindi permesso di caratterizzare il prodotto dal punto di vista chimico, fisico e meccanico prima della posa in opera come manto stradale. Ulteriori prove sono state eseguite direttamente sullo stesso manto stradale, al fine di verificarne la conformità alla normativa vigente di settore, e poter così effettuare il collaudo finale dell'opera.

Un'altra importante applicazione del PFU ha riguardato lo studio e la realizzazione di materiali fonoassorbenti innovativi, ovvero con posa "a getto". Trattasi infatti di una particolare miscela che, a differenza dei pannelli rigidi di usuale uso, viene stesa sul massetto allo stato semiliquido e si solidifica entro le 48 ore. In tale ambito sono state studiate particolari mescole, con differenti percentuali di PFU, che potessero garantire il raggiungimento del potere fonoisolante acustico previsto dalla normativa vigente una volta posate in opera. A tal fine sono state effettuate numerose prove sia meccaniche che acustiche in laboratorio, oltre che in sito sul materiale posato con tecnica a getto direttamente in alcuni appartamenti. Tutti i valori acustici riscontrati sono risultati al di sotto dei limiti di legge, ciò a conferma che il materiale così realizzato può avere importanti applicazioni nel settore edilizio.

Ultima applicazione del PFU effettuata nella presente ricerca è stato il suo utilizzo nella realizzazione di campi da calcio/rugby in erba sintetica. La normativa molto restrigente in tale ambito, approvata dalla Lega Nazionale Dilettanti (LND), ha imposto uno studio molto accurato del materiale da intaso derivante da PFU, sia dal punto di vista chimico che dal punto di vista delle prestazioni meccaniche anche sull'intero sistema. Tuttavia, anche in tale caso, è stato possibile certificare il suddetto materiale e arrivare al collaudo dell'opera realizzata.

L'ultima parte della ricerca è stata infine dedicata all'applicazione del metodo LCA (Life Cycle Assessment) per la valutazione del ciclo di vita dei materiali prodotti dall'attività di recupero del PFU svolta dall'azienda Ambra Ambiente (Cotignola di Ravenna). In particolare, attraverso l'utilizzo di un software dedicato (SimaPro 6.0), è stato possibile confermare che l'attività di riutilizzo/recupero del PFU è complessivamente meno impattante rispetto al suo smaltimento in discarica, tra l'altro ad oggi non più possibile per l'entrata in vigore del D.lgs 36/2003.

Si può pertanto affermare che, le diverse applicazioni svolte nei summenzionati settori, confermano che il PFU è una risorsa da valorizzare e che, i prodotti derivati da PFU che sono stati studiati in questa attività di dottorato, raggiungono prestazioni conformi alle normative vigenti.

Infine, oltre agli aspetti ambientali di minor impatto e al minor utilizzo di materiale vergine inerte, l'attività di recupero del PFU rappresenta certamente un buon investimento in termini di redditività economica.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Morselli L., Marassi R., (2003), “I RIFIUTI La chimica, il ciclo di vita, la valorizzazione, lo smaltimento, il controllo ambientale”, FrancoAngeli, Milano.
- 2) Badino V., Baldo G., (1998), “LCA Istruzioni per l’uso”, Progetto Leonardo, Società Editrice Esculapio, Bologna.
- 3) Comunicazione della Commissione al Consiglio e al Parlamento Europeo, Politica integrata dei prodotti, Bruxelles, 18.6.2003.
- 4) Del Borghi A., Costamagna P., Del Borghi M., Dipartimento di Ingegneria chimica e di Processo “G.B. Bonino”- Università di Genova, “Per le celle a combustibile a ossidi solidi si parte dall’analisi del ciclo di vita (LCA)”, Ambiente & Sicurezza n. 4 – 2003, Supplemento de “Il Sole 24 Ore”.
- 5) Olivieri G., Neri P., Ansaloni E., Setti L., Bologna, “Analisi ambientale del ciclo di vita di un inchiostro ecologico con il metodo LCA (Life Cycle Assessment)”, Atti di Ricicla 1999, Maggioli Editore.
- 6) Notarnicola B. (1999) “Nuovi strumenti di indagine in merceologia: l’analisi del ciclo di vita (LCA). Con il caso studio del pneumatico”.
- 7) Ministero dell’Ambiente in collaborazione con il Centro di Ricerche ed Educazione Ambientale dell’Università di Parma, CLIMA e OZONO Le sfide ambientali del XXI secolo, Supplemento n°1 al n°5, anno 2000 di OASIS.
- 8) Marchetti R. (1993), “Ecologia applicata”, Città Studio Milano.
- 9) Masotti L., (2002), “Depurazione delle acque, tecniche ed impianti per il trattamento delle acque di rifiuto”, Edizioni Calderini, Bologna.
- 10) W. Van den Berg N., Huppes G., Notarnicola B., “Evaluating Options in LCA: The Emergence of Conflicting Paradigms for Impact Assessment and Evaluation”, The International Journal of Life Cycle Assessment, Vol.3 No.5, 1998.
- 11) Ramponi L., Morselli L., Masoni P. (2003), “Applicazione della metodologia LCA a sistemi di gestione integrata dei rifiuti in ambiti territoriali regionali e nazionali”, I RIFIUTI, Morselli, Marassi, FrancoAngeli, Milano.
- 12) ESU-services, Frinschnecht R., Jungbluth N., (2003), “SimaPro 5.1 Database Manual The ETH-ESU 96 libraries”.
- 13) Sylvatica, Norris G., (2003), “SimaPro 5.1 Database Manual The Franklin US LCI library”.
- 14) Pré Consultants, Goedkoop M., Oele M., (2003), “SimaPro 5.1 Reference Manual”.

- 15) Peruzzo, Larousse, "La Grande Enciclopedia", Milano, Gruppo Alberto Peruzzo Raimondi G., "Pneumatici", Fabbri Editori, 1994.
- 16) ARGO, Consorzio Nazionale Volontario Riciclaggio Gomma, "Rapporto ARGO 2003, indagine sul riciclo dei pneumatici usati", Roma, 2004. Mantegazza P.C., Ecopneus, Milano, "Recupero e riutilizzo di pneumatici fuori uso", Atti di Ricicla 2002, Maggioli Editore.
- 17) Notarnicola B., "Il ciclo produttivo del pneumatico: flussi di materia e di energia", Rivista di Merceologia, vol. 35, fascicolo IV, ottobre-dicembre 1996, Cooperativa Libreria Universitaria Editrice Bologna.
- 18) ANPA (Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente), ONR
- 19) (Osservatorio Nazionale sui Rifiuti), "I rifiuti del comparto automobilistico, Studio di settore", Rapporti 16/2002, I.G.E.R. srl, Roma.
- 20) Mincarini M., Settore Rifiuti Industriali, ENEA, "Il ciclo di produzione, consumo e recupero della gomma in Italia", Osservatorio di normativa ambientale, 30 settembre 1998.
- 21) Rilevazioni AIRP, Associazione Italiana Ricostruttori Pneumatici, Stime Ufficio Studi, Bologna, 22 luglio 2004.
- 22) Barbieri M. "Metodologia e recenti sviluppi: analisi del bitume e degli asfaltini" Lab. 2000,01 (2003).
- 23) P. Strausz, P. Peng, J. Murgich, "About the Colloidal Nature of Asphaltenes and the MW of Covalent Monomeric Units" Energy & Fuels (2002), 16 (4), 809-822.
- 24) Gordon D.Airey "Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens" Fuel; May 2003
- 25) J.Stastna, L.Zanzotto, O.J.Vacin "Viscosity function in polymer modified asphalts" Colloid and Interface Science; Dec.2002
- 26) Pasetto M, Tattan F. Conglomerati bituminosi drenanti additivati con polverino di gomma di pneumatici riciclati. Quaderno AIPCR, Verona 1998.
- 27) Mincarini M. La gomma: il ciclo di produzione, consumo e recupero della gomma in Italia. Osservatorio di normativa ambientale.
- 28) Pavimentazioni drenanti e fonoassorbenti pavimentazioni drenanti e fonoassorbenti. Le strade n° 1276 giugno 1991.
- 29) Siragna D. Pneumatici usati, tecniche di recupero. Recycling dicembre 1998. [21] Legnani G. I materiali di scarto nelle pavimentazioni stradali. Le strade n° 1298, novembre/dicembre 1993.
- 30) Giavarini C., Scarsella M. I bitumi modificati con gomma di recupero, parte I. Rassegna del bitume, n 32 anno 1999. [8] Medina j. G., A'ngel del Val M., Raz [23] R. T. Digestio'n del

- Caucho de neuma'ticos incorporado por via seca a las mezclas asfalticas. Atti del x° congresso ibero-latinoamericano dell'asfalto novembre 1999;
- 31) Giavarini C., Scarsella M. I bitumi modificati con gomma di recupero, parte II. Rassegna del bitume n° 33, 1999.
 - 32) Bressi G. Rollando F. Utilizzo del polverino da pneumatici fuori uso nelle pavimentazioni stradali e in altri settori. Istituto per l'ambiente rapporto 96/01, Milano.
 - 33) Bocci M., Sparvoli M. Le fibre stabilizzanti negli splittmastix confronto prestazionale. Atti del VII° convegno SIIV, Ancona, 1996.
 - 34) Sousa J. B., Fonseca P. Freire A. Pais J. Comparaçã da vida á fadiga e deformação permanente entre misturas com betume modificado com borracha reciclada de pneus e convencionais. Atti del X° congresso ibero-latinoamericano dell'asfalto, novembre 1999.
 - 35) Lizcano P. F., Ortiz O'. J. R. Uso de desperdicio plástico para mejorar las propiedades mécanicas de la estructura de pavimento. Atti del X° congresso ibero-latinoamericano dell'asfalto, novembre 1999.
 - 36) Way G.B. OGFC Meets CRM where the Rubber meets the Rubber 12 Years of Durable Success. Atti del convegno internazionale "Asphalt rubber 2000", Portogallo, novembre 2000.
 - 37) Les liants améliorés au caoutchouc de SACER. Revue gènèrale des aèrodromes n°596, avril 1983.
 - 38) Serfass J. P. Fabrication, Utilisation et comportement des bitumes-caoutchouc. Revue gènèrale des aèrodromes n°602, november 1983.
 - 39) Faure B. Les enduits épais au bitume-caoutchouc: Realisations françaises. Revue gènèrale des aèrodromes n°602, november 1983.
 - 40) Huang P., Yan j. Research on properties and technology of crumb rubber asphalt mixture. Atti del convegno internazionale "Asphalt rubber 2000", Portogallo, novembre 2000.
 - 41) Leite L.F.M. , Constantino R. S. Vivoni A. Rheological Studies of Asphalt with ground tire rubber. Atti del convegno internazionale "Asphalt rubber 2000", Portogallo, novembre 2000.
 - 42) L.R.G. Treloar: "The physics of rubber elasticity" Oxford at the Clarendon press 1949
 - 43) I.M. Ward: "Mechanical properties of solid polymers" Wiley 1971
 - 44) G. A. Holzapfel: "Nonlinear Solid Mechanics: A Continuum Approach for Engineering" Wiley 2000
 - 45) F. Pompoli, P. Bonfiglio: "Apparecchiatura per la misura della porosità di materiali a cella aperta" Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Ferrara

- 46) F. Pompoli: "Modelli matematici per l'assorbimento acustico di materiali in fibra di poliestere" Università degli Studi di Bologna 2001
- 47) M. Poluzzi: "Sviluppo di apparecchiature per la misura di porosità e tortuosità di materiali porosi"

Principali siti internet:

- 1) www.pre.nl/simapro/
- 2) www.lexambiente.com
- 3) www.reteambiente.it
- 4) www.ambiente.it
- 5) www.assoricerca.it
- 6) www.ambrambiente.it
- 7) www.consorzioargo.it
- 8) www.ecopneus.it
- 9) www.parlamento.it
- 10) www.matrec.it
- 11) www.uni.com
- 12) www.greenlab/LCA.it
- 13) www.CIT_Ekologik.it
- 14) www.studioIce.it
- 15) www.asphaltrubberitalia.it
- 16) www.bitem.it
- 17) www.ccpl.it
- 18) www.matrec.it
- 19) www.etra-eu.org
- 20) www.etrma.org
- 21) www.shredders.finlane.com
- 22) www.assoallenatori.it
- 23) www.lenntech.it
- 24) www.scienzenews.it
- 25) www.chem.polimi.it
- 26) www.turfgrass.it

Ringraziamenti

Desidero ringraziare innanzitutto il Prof. Francesco Mollica, dell' Università degli Studi di Ferrara, per la professionalità, gentilezza, disponibilità e umanità dimostrata in ogni momento dell'attività di ricerca svolta, oltre all'opportunità concessami di poter svolgere tale studio.

Un sentito ringraziamento anche al Prof. Francesco Pompoli e al Prof. Nicola Prodi, dell' Università degli Studi di Ferrara, per la preziosa e importante collaborazione scientifica nell'ambito delle indagini acustiche svolte presso il loro Dipartimento.

Un particolare ringraziamento all'Azienda Ambra Ambiente (RA) e, in particolare, al Dott. Angelo Terzi e al Dott. Franco Rondinelli, per la disponibilità a fornire i dati aziendali e per il sostegno umano e scientifico dimostrato durante tutti questi anni di collaborazione.

Infine, ma non per questo certo di minor importanza, un amorevole grazie alla moglie Federica, alle bimbe Veronica e Maddalena (ai gemelli-angeli Tommaso e Michele) per avermi “concesso” ancora una volta di studiare, sottraendo loro parte del mio tempo...per questo sarò a lungo in debito.

Un grazie ai miei genitori e a mia sorella Daniela, sempre vicini alle mie scelte.