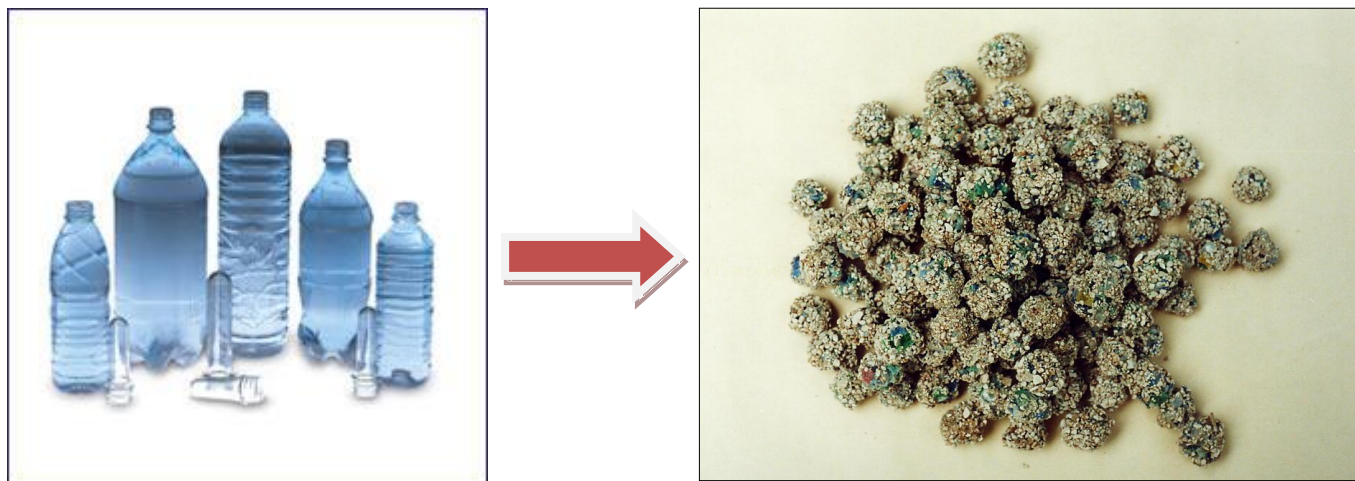


AGGREGATO ARTIFICIALE LEGGERO DI PET

Realizzato con bottiglie di plastica provenienti dalla raccolta differenziata



A. INTRODUZIONE

Il calcestruzzo è un materiale da costruzione artificiale anelastico. E' composto da acqua, cemento, aggregato fine (sabbia), aggregato grosso (pietrisco) e additivi. Il pietrisco è il componente più voluminoso e più presente nell'impasto (varia dal 50% al 70%) ed è sempre più difficile approvvigionarsene poiché è sempre più difficile aprire nuove cave e quelle già aperte vanno ad esaurirsi, Questa circostanza fa sì che i prezzi del pietrisco vadano via via aumentando. In Giappone sono già costretti a frantumare rocce marine.

Il PET, acronimo di PoliEtilenTereftalato, è un polimero diffusissimo e molto impiegato nell'industria delle bevande analcoliche; la quantità di Pet immessa sul mercato italiano ed europeo è sempre più vasta; il riciclato italiano è di circa 200.000 t/anno, quello europeo è di circa 1.500.000 t/anno e nel mondo si stima che sia di circa 9.600.000 t/anno.

L'invenzione del Prof. Ing. Salvatore Lo Presti è un aggregato artificiale leggero, o pietrisco artificiale leggero, sia strutturale che non strutturale, da realizzare mediante l'impiego del PET ottenuto dalla raccolta differenziata; questo aggregato, ottenuto con un originale processo di costruzione brevettato, potrà essere rivestito di sabbia o non rivestito di sabbia a seconda dell'impiego che se ne intende fare. (Fig. 1)



Fig. 1 – alPET e alPET-s

Le diverse tipologie di aggregato al momento disponibili possono essere racchiuse nella seguente

CLASSIFICAZIONE



Aggregato leggero di PET riciclato parzialmente rivestito

- Approvvigionamento: scarto di altre lavorazioni;
- Applicazioni:
 - sfuso: per riempimenti di cavità come coibente ed isolante acustico;
 - inglobato: aggregato per calcestruzzi non strutturali, per massetti isolanti termicamente ed acusticamente, sovrastrutture di solai coibenti ed isolanti, ecc.
- Ottenuto con processo meccanico per inglobamento d'aria;
- Granulometria: 20 - 30 mm;
- Non compattato;
- Parzialmente e grossolanamente rivestito;
- Massa volumica dell'aggregato: $200 \div 500 \text{ Kg/m}^3$;
- Massa volumica del conglomerato: $\sim 1.200 \text{ Kg/m}^3$;
- Resistenza meccanica alla compressione del calcestruzzo: $12 \div 18 \text{ Mpa}$.



Aggregato leggero di PET riciclato grossolanamente rivestito

- Approvvigionamento: scarto di altre lavorazioni;
- Applicazioni: aggregato per massetti isolanti termicamente ed acusticamente, per sovrastrutture di solai coibenti ed isolanti, per calcestruzzi non armati, per muri a gravità, per calcestruzzi debolmente armati, per magroni di sottofondazione, ecc.
- Ottenuto con processo meccanico per inglobamento d'aria;
- Granulometria: 14 - 18 mm;
- Leggermente compattato;
- Grossolanamente rivestito;
- Massa volumica dell'aggregato: $600 \div 900 \text{ Kg/m}^3$;
- Massa volumica del conglomerato: $\sim 1.600 \text{ Kg/m}^3$;
- Resistenza meccanica alla compressione del calcestruzzo: $20 \div 30 \text{ Mpa}$.

Tipo C) **aIPET-s**



Aggregato leggero di PET riciclato per impieghi strutturali

- Approvvigionamento: taglio meccanico di bottiglie riciclate;
- Applicazioni: aggregato per calcestruzzi armati;
- Ottenuto con processo meccanico per inglobamento d'aria;
- Granulometria: 8 - 12 mm;
- Compattazione pilotata;
- Accuratamente e completamente rivestito;
- Massa volumica dell'aggregato: $1.100 \div 1.200 \text{ Kg/m}^3$;
- Massa volumica del conglomerato: $\sim 1.800 \text{ Kg/m}^3$;
- Resistenza meccanica alla compressione del calcestruzzo: $38 \div 48 \text{ Mpa}$.

I calcestruzzi, così detti strutturali, leggeri consentono un minor peso proprio della struttura portante del manufatto che si traduce in (Fig. 2):

- o Possibilità di fondare su un terreno di fondazione meno portante;
- o Possibilità di raggiungere una maggiore altezza degli edifici;
- o Possibilità di effettuare sopraelevazioni di strutture esistenti;
- o Possibilità di impiego nei centri storici dove è prevista la sostituzione dei materiali esistenti con altri più leggeri;
- o Possibilità di effettuare migliori movimentazioni in cantiere;
- o Possibilità di ridurre gli effetti dannosi dell'eventuale sisma.

Il pietrisco artificiale di PET oltre all'applicazione accennata (calcestruzzi leggeri strutturali e non) può essere impiegato in forma sciolta come materiale isolante termo-acustico nel riempimento di cavità (pareti a cassetta, vespai drenanti ecc.), come aggregato di intonaco (se in pezzatura ridotta) che svolge pure funzione decorativa se lasciato alla vista, come elemento decorativo di pavimentazioni esterne (marciapiedi, passi perduti e camminamenti pedonali nei giardini e nei parchi attrezzati), come alleggerimento di pannelli di tamponatura o di tramezzatura ecc.

I prodotti attualmente in commercio che assolvono allo stesso scopo sono. La vermiculite, il polistirene sinterizzato espanso, la perlite, l'argilla espansa, la lana di vetro e la lana di roccia, la pietra di pomice. Tuttavia mentre il Pet trova impiego in tutte le applicazioni dette, i materiali citati trovano impiego in una o al massimo due applicazioni.



Fig. 2 - Edificio di grande altezza.

È da notare che il pietrisco artificiale di PET è di qualità notevolmente superiore a tutti quelli citati poiché da esperienze effettuate si è riscontrato:

- Nessun galleggiamento: a differenza degli altri aggregati leggeri l'aIPET non galleggia nella malta cementizia allo stato fresco in ragione della sua superficie molto corrugata e della sua massa volumica;
- Nessuno o trascurabile assorbimento d'acqua d'impasto;
- Possibilità di pilotare la densità dei granuli in fase di realizzazione; ciò si traduce in possibilità di prevedere minore o maggiore resistenza meccanica del conglomerato cementizio, con legge parabolica, a fronte di minore o maggiore assa volumica.

B. BREVETTO

Titolare dell'invenzione è il citato Prof. Lo Presti che ha depositato in Italia, in data 21 novembre 2003 la domanda di brevetto che gli è stato assegnato il 7 marzo 2006 con il n° **0001332599**.

Successivamente il Prof. Lo Presti ha chiesto l'internazionalizzazione del brevetto nei seguenti paesi (Fig. 3):

- in Europa dove è stato accordato, in data 25 novembre 2009 col n° **1537168**;
- in Canada, dove è stato accordato, in data 20 dicembre 2011 col n° **2.498.661**;
- in Giappone dove è stato accordato, in data 28 ottobre 2011 col n° **4851087**.



Fig. 3 – Attestati del Brevetto Europeo, Canadese e Giapponese.

In particolare i 12 singoli Stati Europei dove è stata chiesta la validazione del Brevetto Europeo sono:

BELGIO – BULGARIA – FRANCIA – GERMANIA - GRAN BRETAGNA – GRECIA - ITALIA - REPUBBLICA CECA – ROMANIA - SPAGNA - SVIZZERA – TURCHIA



Fig. 4 – Paesi dove è stato validato il brevetto.



Fig. 5 – 1° Prototipo

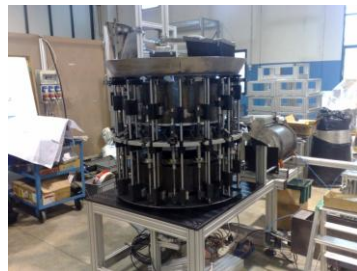


Fig. 6 – 2° Prototipo



Fig. 7 – 3° Prototipo

Fig. 8 – Aggregato, sia rivestito che non rivestito di sabbia, prodotto dalla macchina

Ai fini della produzione industrializzata del prodotto è in fase di collaudo la macchina presso la ditta ABL



automazione s.r.l. di Brescia che ha realizzato dapprima tre prototipi e successivamente un esemplare completo ed operante che necessita ancora tuttavia di ulteriori affinamenti motivo per il quale si sta attualmente operando nella direzione della messa a punto e poi del collaudo finale. (Figg. 5-8)

C. DATI NUMERICI

- La temperatura di fusione del PET è di circa 265 °C;
- La temperatura di infiammabilità del PET è 370 °C;
- La temperatura di auto ignizione del PET è 500 °C;
- Le bottiglie di plastica immerse nell'ambiente impiegano circa **7 secoli** prima che si decompongano completamente in modo spontaneo;
- Il **60%** delle bottiglie di plastica utilizzate non vengono ancora riciclate.
- In **Italia** vengono consumati ogni anno in media **270 litri** di acqua minerale e di bibite varie equivalenti a **135 bottiglie** da 2 litri procapite. Solo dai supermercati italiani escono **15 miliardi di bottiglie in PET** ogni anno;
- Il quantitativo di bottiglie riciclate in Italia ogni anno (40%) è pari a:
15 miliardi x 0,4 = 6 miliardi → 200 milioni kg → 143.000 mc;
- In Europa si ricicla (anno 2010) 1,5 miliardi di kg di PET → 1.000.000 mc PET
- Una bottiglia da 2 litri ha una superficie laterale utile di 850 cm²
- Un flakes ricavato dalla bottiglia ha una superficie di 0,64 cm²
- Con una bottiglia si possono quindi ottenere n° flakes 1.330
- La macchina richiede per ogni aggregato ~ n° 12 flakes
- Con una bottiglia si possono ottenere ~ n° 100 aggregati
- Il peso di una bottiglia da 2 l (compreso fondo e collo) è ~ 30 g
- Il peso di una bottiglia (senza fondo e collo) è ~ 20 g
- Il peso di un aggregato è 0,20 g
- La massa volumica del Pet è ~ 1.400 Kg/m³
- Il numero di alPet (d = 1,2 cm) ottenibili con 1 m³ di Pet è circa 7.000.000
- Numero di alPet contenuti in 1 m³ è ~ 580.000
- Con 1 m³ di Pet si possono ottenere 12 m³ di alPET
- Con 1 m³ di Pet si ottengono 23 m³ di alPET-r (rivestito)
- La possibile produzione di alPET-r in Italia è di 143.000 mc x 23 = 3.289.000 m³.
- Nel resto d'Europa la possibile produzione di alPET-r è 1.000.000 mc x 23 = 23.000.000 m³

D. PRODUZIONE

Nella Fig. 8 è schematizzato il processo di costruzione dell'aggregato artificiale leggero di PET rivestito (alPET-s) partendo dalle bottiglie di plastica ottenute dal riciclaggio per giungere al granulo finito; nell'ultima immagine è fotografato un provino cubico sezionato che è stato formato con calcestruzzo il cui aggregato grosso naturale è stato interamente sostituito con quello artificiale alPET-s. Dall'immagine si può ben

osservare come i granuli sono uniformemente distribuiti all'interno della massa a dimostrazione del non galleggiamento dei granuli di alPET-s all'interno della malta cementizia.

In particolare il processo è più dettagliatamente illustrato dalle seguenti figure 9-15 che descrivono tutte le fasi di realizzazione.



Fig. 9 – Schema di realizzazione dell'aggregato leggero artificiale alPET-s.

Si parte dal taglio delle bottiglie in flakes (Fig. 10), cioè scagliette di circa 0.6 cm di lato. Qui, a differenza di altre applicazioni del PET riciclato, non è necessario che i flakes siano dello stesso colore, dello stesso spessore, delle esatte dimensioni, privi di etichette e colle ecc.



Fig. 10 – Taglio delle bottiglie di PET in Flakes.

In Fig. 11 si illustra la seconda fase, quella cioè del riscaldamento dei flakes ad una temperatura compresa tra 220 °C e 240 °C. Questa procedura è indispensabile per rammollire le scagliette che così si incurvano formando voltine a doppia curvatura concomitante.



Fig. 11 – Riscaldamento dei flakes.

Le scaglie rammollite a forma di voltine, se avvicinate e messe tra loro a contatto, tendono spontaneamente ad aggregarsi e, a raffreddamento avvenuto, a mantenere permanentemente il mutuo collaggio spontaneo. Tuttavia il processo, del tutto originale e brevettato, ha maggiore efficacia se si imprime all'insieme delle voltine rammollite un movimento rotatorio (Fig. 12) che consente agli elementi ravvicinati di assumere una forma sferoidale, che possiamo così definire aggregato artificiale leggero di PET (alPET).



Fig. 12 – Collaggio dei flakes mediante rotazione forzata.

La fase successiva, illustrata in Fig. 13, consiste nell'imprimere una pressione al granulo appena formato ed ancora caldo. Il procedimento non è tassativo, si rende però necessario qualora si intenda produrre un aggregato che consenta prestazioni meccaniche maggiori al calcestruzzo che sarà realizzato con l'aggregato alPET. Anche questo processo è originale e brevettato ed unico nel panorama degli aggregati artificiali poiché con esso si può pilotare il risultato finale in merito alle prestazioni meccaniche dei manufatti realizzati in calcestruzzo. È dunque possibile imprimere maggiori o minori pressioni all'aggregato ancora caldo e quindi produrre elementi di pezzature e di classe di resistenza differenti in funzione dell'uso finale richiesto e dei desiderata dell'utenza.



Fig.13 – Possibilità di imprimere pressioni al granulo ancora caldo.

La fase successiva (Fig. 14) prosegue lungo la strada del miglior comportamento meccanico del conglomerato cementizio realizzato con l'aggregato leggero di PET. Dalle esperienze di laboratorio effettuate è emerso il fenomeno della non perfetta compatibilità tra la superficie esterna dell'aggregato alPET con la malta cementizia; tale circostanza comporta una non elevata prestazione meccanica dei manufatti (15÷20 Mpa) che suggeriscono l'impiego di alPET per strutture non portanti. Si è trovata tuttavia, dopo numerosi tentativi, la possibilità di rendere perfettamente compatibili la superficie esterna dell'aggregato con la malta cementizia; la soluzione consiste nel riscaldare ulteriormente l'alPET appena formato ad una temperatura di 150 ÷ 200 °C al fine di rammollirlo, evitando tuttavia il fenomeno della deformazione, per poi metterlo a contatto con granelli di sabbia.

Questa procedura, anch'essa del tutto originale e brevettata, consente di rivestire permanentemente e stabilmente la superficie esterna del granulo che così si dota di un'interfaccia del tutto compatibile con la malta cementizia dove la sabbia è un elemento essenziale.



QUINTO PASSO:
LEGGERO RISCALDAMENTO DELLA SUPERFICIE ESTERNA DEL GRANULO CONSOLIDATO





Fig. 14 – Rivestimento si sabbia dell’aggreto leggero artificiale alPET-r

L’ultima fase di realizzazione dell’alPET-s (Fig. 15), cioè dell’aggregato artificiale alleggerito di PET rivestito di sabbia, è quindi quella del raffreddamento che consente ai granuli di sabbia penetrati nelle voltine rammollite di PET di essere permanentemente e tenacemente trattenuti a causa della chiusura delle fessure conseguente al raffreddamento del granulo. Dalle esperienze di laboratorio, granuli sabbati hanno consentito resistenze meccaniche a calcestruzzi con essi realizzati e sottoposti a processo di compressione anche di 50 Mpa, ciò consente di definire l’alPET-s un aggregato artificiale leggero del tipo STRUTTURALE.



Fig. 15 – Ottenimento dell’alPET-s a seguito del raffreddamento dei granuli.

E. ESPERIENZE DI LABORATORIO

Sono state effettuate esperienze presso i laboratori autorizzati GEOLAB s.r.l. e METRO s.r.l. di Palermo per testare il nuovo prodotto alPET-r al fine di conoscerne le proprietà meccaniche e sono state effettuate due distinte miscele delle quali la n° 1 volutamente penalizzante e la n° 2 più performante:

MIX-DESIGN 1

Componente	Volume (litri)	Peso (kg)
• Acqua	170	170
• Cemento (CEM1 42,5 R)	90	283
• Superfluidificante	3	3
• Sabbia	220	594
• alPET-r	500	560
• Aria intrappolata	17	0
	<u>1.000</u>	<u>1.610</u>

Rapporto a/c = 0,60 – Resistenza meccanica allo schiacciamento: Rc = 27 Mpa

MIX-DESIGN 2

Componente	Volume (litri)	Peso (kg)
• Acqua	175	175
• Cemento (CEM1 42,5 R)	138	435
• Superfluidificante	7	7
• Sabbia	333	900
• alPET-r	330	370
• Aria intrappolata	17	0
	<u>1.000</u>	<u>1.887</u>

Rapporto a/c = 0,40 – Resistenza meccanica allo schiacciamento: Rc = 49 Mpa

	1^ RICETTA	2^ RICETTA
CEM I 42.5 R	283 (kg/m³)	435 (kg/m³)
Aggregate PET (13-20 mm)	560 (kg/m³)	370 (kg/m³)
Sand from crusher	594 (kg/m³)	900 (kg/m³)
Water	170 (l/m³)	175 (l/m³)
Superplast. - Iperplasticizer	3 (l/m³)	7 (l/m³)
Ratio water/cement	0.6	0.4
Consistence	S5	S5
Volume mass	1610 (kg/m³)	1887 (kg/m³)
Compressive strength (28 dd)	27 MPa	49 MPa

Fig. 16 - Due ricette messe a confronto

F. CONSIDERAZIONI SULLA RESISTENZA MECCANICA

L'alta resistenza meccanica accompagnata dalla bassa massa volumica trova spiegazione in quanto l'aggregato alPET-s è ottimamente compatibile con la malta cementizia ma anche e soprattutto perché la sua capacità di resistere ai carichi gli è conferita dalla forma non già dalla sua massa. L'alPET-s dunque segue la legge delle strutture resistenti per forma che ha consentito agli ingegneri di poter progettare coperture di grande luce con strutture molto sottili confidando esclusivamente sulla forma della struttura detta: a **doppia curvatura concomitante**.

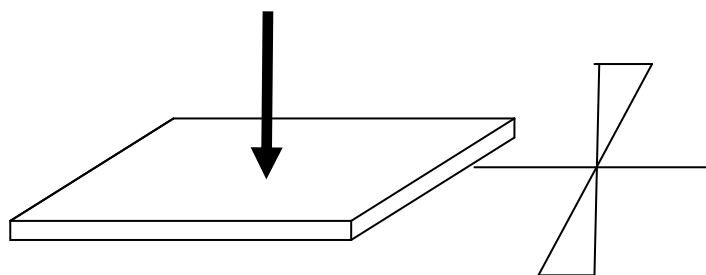


Fig. 17 – Principio della resistenza per forma.

Forza normale alla superficie su cui agisce. Sezione parzializzata a causa della non scomponibilità della forza agente lungo direzioni tangenti alla superficie.

Come mostrato in Fig. 17 una struttura piana sottile soggetta ad una forza ortogonale è sollecitata a flessione in quanto questa forza non può scomporsi in altre forze giacenti su detta superficie. Ciò comporta che ad opporsi all'intera sollecitazione è solamente il sottile strato di materia compreso nello spessore; questo risulta insufficiente, pertanto la struttura cede incurvandosi.

Si ha così la cosiddetta parzializzazione della sezione resistente poichè la superficie superiore tende ad accorciarsi e quella inferiore tende ad allungarsi, si manifestano dunque due sollecitazioni di segno opposto: la compressione che agisce al bordo superiore e la trazione che agisce al bordo inferiore di cui al diagramma a farfalla di figura 17 dove si può notare come la sezione non è uniformemente sollecitata, l'entità non è costante passando dal massimo ai bordi per giungere a zero in mezzeria dove passa l'asse neutro.

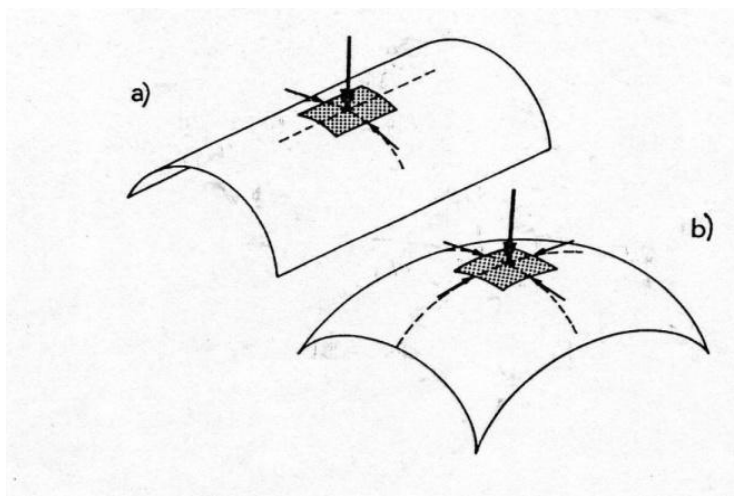


Fig. 18 – Principio della resistenza per forma.
Semplice curvatura e doppia curvatura concomitante.

In Fig. 18 sono disegnate due superfici curve: a) è una superficie a semplice curvatura, b) è una superficie a doppia curvatura concomitante. In entrambe la forza applicata può scomporsi in componenti tangenti alla superficie che non provocano sforzi di flessione ma di compressione. La compressione è una sollecitazione che se baricentrica procura un diagramma rettangolare essendo costante lo sforzo di applicato in tutti i punti della sezione. Si ha quindi l'ottimizzazione della sezione che viene interessata tutta ad opporsi alla forza applicata.

Una struttura quindi che sia dotata di una doppia curvatura concomitante e che sia continua, cioè senza soluzione di continuità, può sopportare carichi notevoli perché è sollecitata, grazie alla sua forma, a compressione e tutta la materia di cui è costituita, e non solo quindi quella presente nel suo spessore, è chiamata a resistere allo sforzo applicato. Questa struttura si dice **resistente per forma**. I vantaggi sono indubbi, basti pensare alla snellezza che può essere assegnata alla struttura che, oltre ai benéfici effetti estetici, si traduce in notevole leggerezza pur garantendo una notevole resistenza meccanica.

L'aggregato aPET-r è una struttura composta da voltine di PET a doppia curvatura concomitante nella superficie dell'involucro e da aria al suo interno; quindi è molto leggero e grazie alla forma degli elementi superficiali anche molto resistente agli sforzi di compressione.

G. PREMIO INTERNAZIONALE ASSEGNATO PER L'INVENZIONE DELL'AGGREGATO aIPET-r

Per questa invenzione nell'anno 2007 è stata assegnata al Prof. Ing. Salvatore Lo Presti la medaglia di bronzo al 35° Salone Internazionale delle Invenzioni di Ginevra come mostrato in Fig. 19.



Fig. 19 – Medaglia di bronzo al 35° Salone Internazionale delle invenzioni di Ginevra.



Fig. 20 – Granulo tipo C) alPET-s1 strutturale, parte residuale di un provino cubico confezionato con granuli di alPET-s1 sottoposto a schiacciamento e provino cubico sezionato confezionato anche questo con granuli alPET-s1.



Prof. Ing
SALVATORE LEANDRO LO PRESTI
 Professore Associato di
PRODUZIONE EDILIZIA
 Università di Palermo
 Facoltà di Ingegneria



Cavaliere
Gerusalemmitano

PRESIDENTE ASCI
 (Associazione Sperimentatori Calcestruzzi Innovativi)

www.asciweb.it
 Viale Leonardo Da Vinci, 302 – 90135 Palermo
 Tel.- Fax +39 091 405140 - cell. +39 320 4330320
 E-mail: info@asciweb.it - salvatore.lopresti@unipa.it