SIAS s.p.a.
segnaletica stradale

DISPENSE TECNICHE

NOTE SULLA RETRORIFLETTENZA: IL CASO DELLE **MICROSFERE**

Aprile 2020

studi - progettazioni - consulenze
Cap. Soc. € 300.000,00 i.v.
p. iva/cod. fisc. 01854400981
r.e.a. n. 361323 - reg. imp. brescia n. 01854400981

via Prade, 37
25041 Boario Terme (BS)
Tel. 0364.46272 - Fax 0364.466574
www.siasspa.it - info@siasspa.it - sias@pec.it

SOMMARIO

1 AMBITO DI INDAGINE 3
2 ILLUMINAMENTO, LUMINANZA, FATTORE DI LUMINANZA 4
3 CONCETTI ELEMENTARI DI OTTICA 8
3.1 LA LEGGE DI SNELL 8
3.2 SFERA IN UN MEZZO TRASMISSIVO 9
3.3 SFERA IN UN MEZZO NON TRASMISSIVO 10
4 LE VARIABILI CHE CONDUCONO AL MIGLIOR RISULTATO 16
4.1 INDICE DI RIFRAZIONE 16
4.2 GRADO DI AFFODAMENTO DELLA MICROSFERA NEL SUPPORTO 17
4.3 DIAMETRO 21
4.4 SINTESI 21
4.5 ESEMPIO: MICROSFERE PER MATRICE IN VERNICE 23
5 LA SCHEDA TECNICA: IL RANGE GRANULOMETRICO 25

studi - progettazioni - consulenze
Cap. Soc. € 300.000,00 i.v.
p. iva/cod. fisc. 01854400981
r.e.a. n. 361323 - reg. imp. brescia n. 01854400981

via Prade, 37
25041 Boario Terme (BS)
Tel. 0364.46272 - Fax 0364.466574
www.siasspa.it - info@siasspa.it - sias@pec.it

1 AMBITO DI INDAGINE

La presente nota rientra in una serie di documenti redatti da Sias S.p.A., inizialmente per uso interno ed in seguito divulgati al pubblico, con l'intento di illustrare in modo semplice - ma non semplicistico - alcuni concetti scientifici alla base delle proprie attività.

Il documento prende in esame, dal punto di vista della fisica ottica, le particelle sferiche di vetro trasparente comunemente definite "microsfere", applicate su prodotti di segnaletica orizzontale (pitture, materiali plastici induriti a freddo e materiali termoplastici) mediante post-spruzzatura. L'intento dell'applicazione di questi materiali è quello di rendere visibile la segnaletica orizzontale anche in ambito notturno, mediante la retroriflessione dei raggi incidenti dei proiettori di un veicolo verso il conducente.

Figura 1 Particolare della superficie finita di una striscia in termoplastico.

studi - progettazioni - consulenze
Cap. Soc. € 300.000,00 i.v.
p. iva/cod. fisc. 01854400981
r.e.a. n. 361323 - reg. imp. brescia n. 01854400981
via Prade, 37
25041 Boario Terme (BS)
Tel. 0364.46272 - Fax 0364.466574
www.siasspa.it - info@siasspa.it - sias@pec.it

2 ILLUMINAMENTO, LUMINANZA, FATTORE DI LUMINANZA

I concetti di "illuminamento" e di "luminanza" stanno alla base dei fenomeni fisici analizzati nella presente dispensa.

L'**ILLUMINAMENTO**, generalmente indicato con la lettera "E", è una grandezza fisica fotometrica, misurata in lux [lux], determinata dal rapporto tra il flusso luminoso Φ emesso da una sorgente, misurato in lumen [lm], e la superficie S dell'oggetto illuminato, misurata invece convenzionalmente in metri quadrati [m^2]. Un lux corrisponde all'illuminamento prodotto su una superficie perpendicolare ai raggi da una sorgente con intensità luminosa di 1candela posta a 1metro di distanza.

Tali grandezze in gioco sono quindi correlate dalla seguente equazione fondamentale:

$$E = \frac{\Phi\ [lm]}{S\ [m^2]}$$

Due esempi possono risultare d'aiuto nella comprensione.

Esempio 1

Si consideri una stanza buia in cui venga accesa la lampadina indicata in Figura 2. Tra le caratteristiche tecniche indicate sulla confezione è presente il valore del flusso luminoso Φ della stessa, quantificato in 806 lumens.

Figura 2 Lampadina a LED da 806lumens.

Al fine di definire l'illuminamento prodotto da tale lampadina, è necessario definire la superficie illuminata dal relativo flusso luminoso. Nell'ipotesi di accensione della stessa in una stanza di $10m^2$, il valore dell'illuminamento "E" risulta pari a:

$$E = \frac{\Phi}{S} = \frac{806lm}{10m^2} = 80{,}6lux$$

Esempio 2

Uno stadio di Serie A necessita, per avere un'illuminazione corretta, di un illuminamento di almeno 500lux. Considerando una superficie di 10800 m^2 (tipica di un campo da 120m x 90m), è possibile determinare il flusso luminoso che la sorgente dovrà garantire per l'ottenimento di un'illuminazione corretta. Invertendo la formula fondamentale presentata in precedenza:

$$\Phi = E \cdot S = 500lux \cdot 10800m^2 = 5\ 400\ 000\ lumens$$

Si noti che se tali lumen fossero da realizzare con delle lampadine da 806 lumens indicate in precedenza, ce ne vorrebbero circa 6700! Per avere un ordine di grandezza, di interesse nel presente ambito, si può tenere presente che i fanali di un'auto forniscono un flusso luminoso Φ variabile dai 1000lumens ai 3600lumens (nel caso di lampade ai gas di xeno).

La Figura 3 introduce il secondo concetto alla base della presente trattazione: la luminanza.
L'immagine mostra ciò che avviene nell'istante in cui il fascio luminoso prodotto dai fanali colpisce la segnaletica. Per effetto delle microsfere stese sulla superficie della striscia (o compresa all'interno del prodotto verniciante), una parte della luce prodotta ritorna al conducente.
La luce "di ritorno" è caratterizzata da una grandezza fisica, detta luminanza.

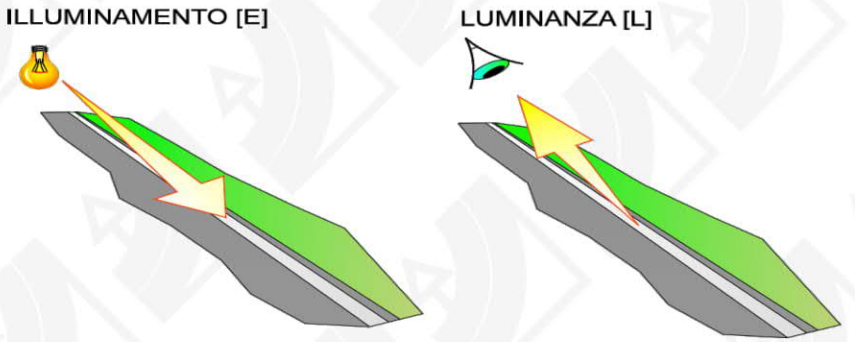


Figura 3 Illuminamento e luminanza.

La **LUMINANZA** "L" è una grandezza fotometrica definita dal rapporto tra l'intensità luminosa, misurata in candele [cd], emessa da una sorgente nella direzione dell'osservatore e l'area apparente della superficie emittente (espressa in metri quadrati [m^2]). L'unità di misura di questa grandezza è il nit [nit].

studi - progettazioni - consulenze
Cap. Soc. € 300.000,00 i.v.
p. iva/cod. fisc. 01854400981
r.e.a. n. 361323 - reg. imp. brescia n. 01854400981

via Prade, 37
25041 Boario Terme (BS)
Tel. 0364.46272 - Fax 0364.466574
www.siasspa.it - info@siasspa.it - sias@pec.it

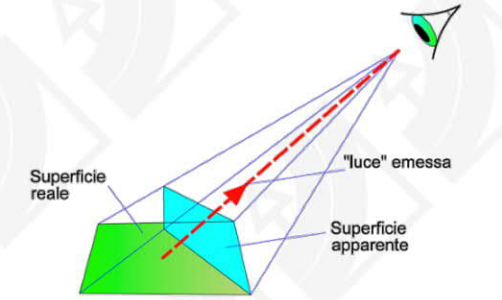


Figura 4 Superficie apparente.

Le due grandezze fisiche sopra citate sono correlate da un fattore, detto **FATTORE DI LUMINANZA**, nel seguito introdotto da un esempio in ambito sportivo.

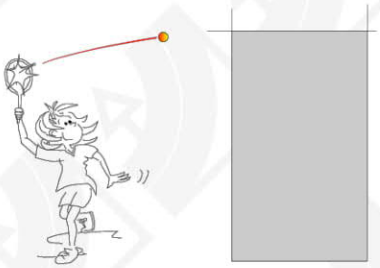


Figura 5 Tennis, fase di battuta.

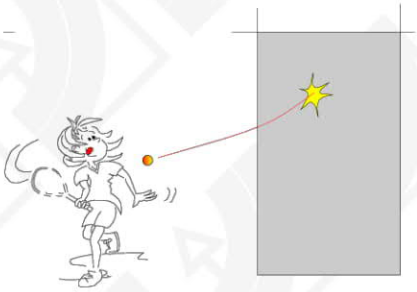


Figura 6 Tennis, fase di rimbalzo.

S'immagini un giocatore di tennis in fase di battuta (Figura 5) che faccia rimbalzare la pallina contro una parete (Figura 6).

La forza che imprime nella battuta rappresenta l'illuminamento "E".

In seguito all'impatto contro il muro la pallina rimbalzerà, ritornando verso il giocatore con una forza minore. La forza con cui la pallina effettua il ritorno rappresenta invece la luminanza "L".

Il **FATTORE DI LUMINANZA** "RL" non è altro che il rapporto - adimensionale - tra le due grandezze: la luminanza "L" e l'illuminamento "E".

$$RL = \frac{L}{E}$$

Per definizione, il fattore di luminanza è sempre compreso tra 0 e 1.

Si è detto come il rapporto risulti adimensionale; tuttavia si tende comunque ad indicare un valore di RL con l'unità di misura $[\frac{mcd}{m^2\ lux}]$, soprattutto nel caso di misurazioni.

Lo strumento adibito a tale scopo prende il nome di "retroriflettometro". Il funzionamento dello stesso si basa sull'emissione di un fascio luminoso di intensità nota in corrispondenza di una superficie - anch'essa nota. Risulta pertanto possibile, per esso, definire il valore dell'illuminamento. In seguito alla misurazione dell'intensità luminosa, ossia "la luce di ritorno" - e quindi della luminanza - esso è in

grado di effettuare il calcolo del fattore di luminanza. Si noti come usualmente il valore riportato sul display sia sempre compreso tra 0 e prossimo a valori superiori a 100, contrariamente a quanto asserito in precedenza. Il motivo è insito nella scelta delle unità di misura: al fine di "normalizzare" il risultato, la luminanza viene espressa in millicandele (10^{-3} candele) e non in candele.
La seguente espressione metterà in chiaro quanto discusso:

$$RL = \frac{L}{E} = \frac{\frac{cd}{m^2}}{lux} = \frac{\frac{cd}{m^2}}{\frac{cd}{m^2}} = [-]$$

Riguardo le "condizioni di misurazione" la normativa stabilisce come lo strumento debba simulare l'illuminamento effettuato da un fascio luminoso emesso da un'auto che si trova a 30 metri dalla segnaletica in esame, illuminata con un faro installato a 60 cm da terra, analizzando la luminanza dal punto di vista dell'occhio dell'osservatore, sempre posizionato a 30 metri ma a 1,20m da terra.

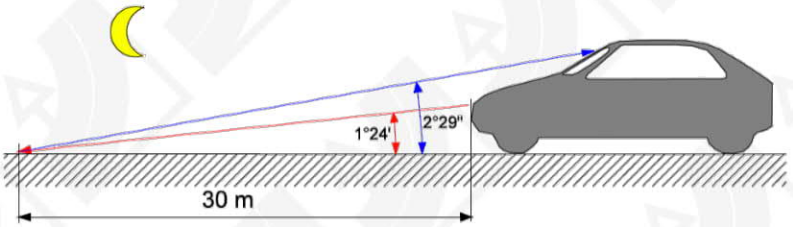


Figura 7 Condizioni di misurazione.

È comprensibile come, nell'ambito della segnaletica orizzontale, una striscia "performante" in termini di visibilità, sia caratterizzata da un elevato valore del fattore di luminanza RL. Analizzati i fattori illuminamento e luminanza che la determinano, è facile comprendere come l'unico su cui si possa influire nel momento della realizzazione della segnaletica, e quindi di interesse nel presente ambito, sia la luminanza. Risulta infatti impossibile agire in questo ambito sul valore dell'illuminamento, caratteristico invece del fanale dell'automobile.
Il modo per aumentare il fattore di luminanza è quindi quello di impiegare "al meglio" gli elementi che lo determinano, ossia le microsfere. Tornando all'esempio della pallina da tennis, facendo in modo che il valore della forza con cui la pallina ritorna al battitore risulti il più vicino possibile a quella della fase di battuta. Per portare a termine tale proposito, è necessario illustrare nello specifico il funzionamento di una microsfera quando viene interessata da un raggio luminoso.

Figura 8 Dettaglio delle microsfere.

studi - progettazioni - consulenze
Cap. Soc. € 300.000,00 i.v.
p. iva/cod. fisc. 01854400981
r.e.a. n. 361323 - reg. imp. brescia n. 01854400981
via Prade, 37
25041 Boario Terme (BS)
Tel. 0364.46272 - Fax 0364.466574
www.siasspa.it - info@siasspa.it - sias@pec.it

3 CONCETTI ELEMENTARI DI OTTICA

3.1 LA LEGGE DI SNELL

La Legge di Snell descrive quanto i raggi sono deviati quando passano da un mezzo ad un altro. Se il raggio proviene da una regione con indice di rifrazione n_1 ed entra in un mezzo ad indice di rifrazione n_2, gli angoli di incidenza "a" e di rifrazione "c" sono legati dall'espressione:

$$n_1 \cdot \text{sen}(a) = n_2 \cdot \text{sen}(c)$$

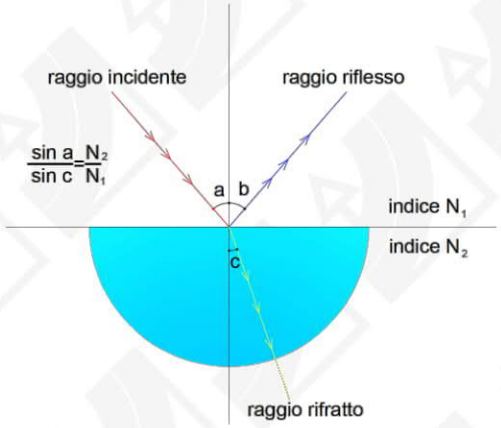


Figura 9 Legge di Snell.

La figura sopra riportata mostra due mezzi trasmissivi con indice di rifrazione n_1 (in alto) e n_2 (in basso) in contatto tra loro attraverso una superficie, che viene chiamata interfaccia.
Il raggio incidente (in rosso) proveniente dal mezzo in alto colpisce l'interfaccia in un punto. A partire da tale punto tracciamo la retta perpendicolare all'interfaccia, che viene chiamata "normale all'interfaccia". L'angolo tra la normale e il raggio incidente viene chiamato angolo d'incidenza, "a". Il raggio attraversa l'interfaccia e prosegue nel mezzo posto in basso, caratterizzato da un indice di rifrazione n_2. L'angolo che tale raggio rifratto forma con la normale si chiama angolo di rifrazione, "c". La legge di Snell sopra riportata individua la relazione tra i due angoli.
L'indice di rifrazione esprime la capacità di un materiale di rifrangere la luce. Assunto come indice di rifrazione di riferimento quello dell'aria (n=1), i materiali più comuni assumono generalmente valori compresi tra 1.5 e 1.9 per il vetro, arrivando oltre a 2.0 nel caso del diamante.

Al fine di rendere comprensibile il fenomeno dell'incidenza di un raggio di luce nei confronti di una microsfera, si riportano i casi di una sfera posta in un mezzo trasmissivo e in un mezzo non trasmissivo.

3.2 SFERA IN UN MEZZO TRASMISSIVO

Si analizza nel presente paragrafo il caso di una sfera di vetro (mezzo trasmissivo con indice di rifrazione n_2=1.5) immersa in aria (mezzo trasmissivo con indice di rifrazione n_1=1) interessata da un raggio luminoso - proveniente dai fanali di un veicolo - con angolo di incidenza in corrispondenza dell'interfaccia pari a=30°. La Figura 10 illustra la situazione:

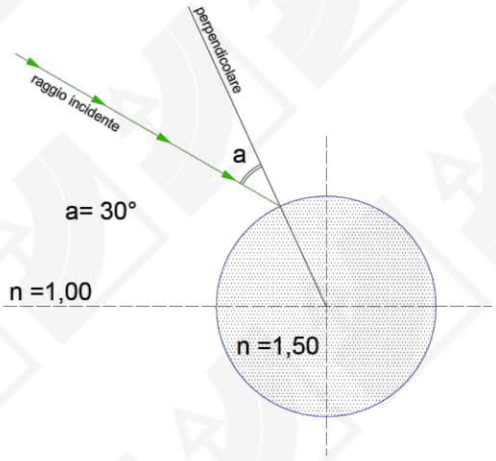


Figura 10 Raggio incidente.

Per effetto della Legge di Snell, esposta in precedenza, il raggio incidente (verde) appena entrato nella microsfera subirà una deviazione. La direzione del raggio rifratto (in rosso) sarà governata dalla Legge di Snell. L'angolo di rifrazione (Figura 11) risulterà infatti pari a:

$$b = \arcsen\left[\sen(a)\cdot\frac{n_1}{n_2}\right] = \arcsen\left[\sen(30°)\cdot\frac{1}{1.5}\right] = 19{,}47°$$

La deviazione subita dal raggio risulta quindi pari a:

$$30° - 19.47° = 10.53° \approx 11°$$

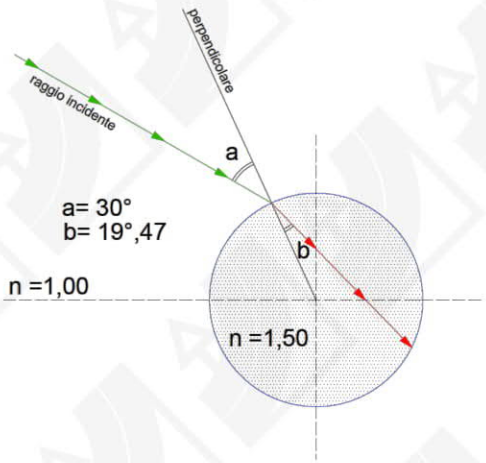


Figura 11 Deviazione subita dal raggio incidente.

Il raggio rifratto all'interno della sfera la inciderà nuovamente in corrispondenza della faccia opposta rispetto a quella di ingresso, uscendo nuovamente nel mezzo aria con un angolo pari a 30°.

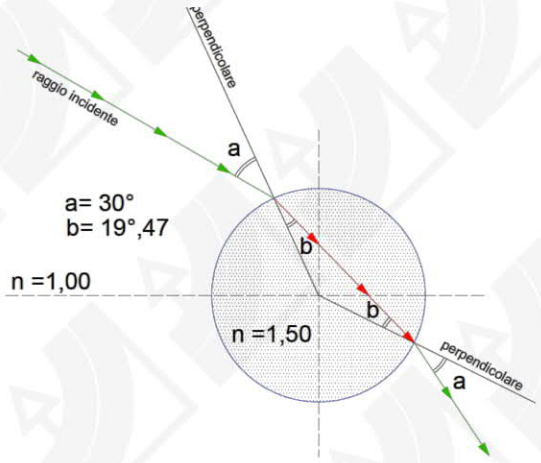


Figura 12 Uscita del raggio incidente.

Per completezza nell'esposizione, si fa notare come sia stato volutamente non considerato l'elemento "raggio riflesso". Lo schema reale - completo - è infatti quello riportato nella figura seguente:

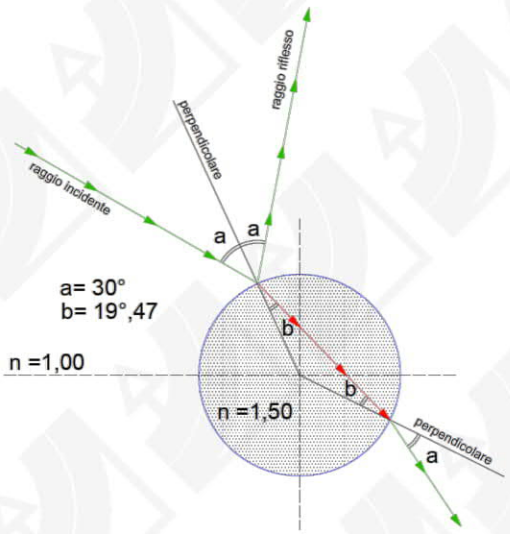


Figura 13 Schema completo.

3.3 SFERA IN UN MEZZO NON TRASMISSIVO

Si prenda ora in esame il caso in cui il raggio rifratto (in rosso in Figura 14) trovi un materiale non trasmissivo in corrispondenza della faccia opposta a quella di entrata. Tale materiale potrebbe essere rappresentato ad esempio, nel caso della segnaletica orizzontale, dal supporto in vernice o in termoplastico. La situazione è quindi quella rappresentata nella seguente figura:

studi - progettazioni - consulenze
Cap. Soc. € 300.000,00 i.v.
p. iva/cod. fisc. 01854400981
r.e.a. n. 361323 - reg. imp. brescia n. 01854400981
via Prade, 37
25041 Boario Terme (BS)
Tel. 0364.46272 - Fax 0364.466574
www.siasspa.it - info@siasspa.it - sias@pec.it

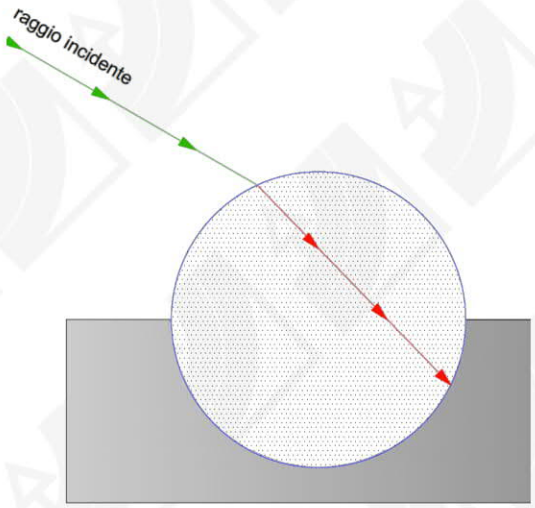


Figura 14 Raggio incidente una sfera posta su mezzo non trasmissivo - Parte 1.

Una volta penetrato all'interno della sfera, il raggio rifratto inciderà quindi la parte opposta, subendo esclusivamente il fenomeno definito come "riflessione".

Definita la perpendicolare nel punto di incidenza, il raggio "rimbalzerà" con lo stesso angolo di incidenza "b" e nuovamente si troverà sul lato di ingresso, incidendo la sfera in corrispondenza del punto Y indicato in Figura 15.

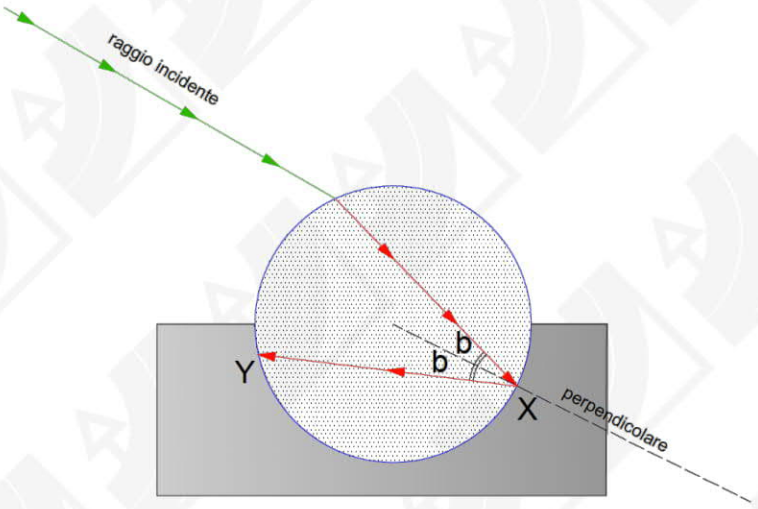


Figura 15 Raggio incidente una sfera posta su mezzo non trasmissivo - Parte 2.

Alla stregua del passaggio precedente, rispetto ancora alla perpendicolare al piano nel punto Y, il raggio verrà nuovamente riflesso all'interno della sfera non avendo la possibilità di uscire, a causa della presenza del materiale non trasmissivo.

studi - progettazioni - consulenze
Cap. Soc. € 300.000,00 i.v.
p. iva/cod. fisc. 01854400981
r.e.a. n. 361323 - reg. imp. brescia n. 01854400981

via Prade, 37
25041 Boario Terme (BS)
Tel. 0364.46272 - Fax 0364.466574
www.siasspa.it - info@siasspa.it - sias@pec.it

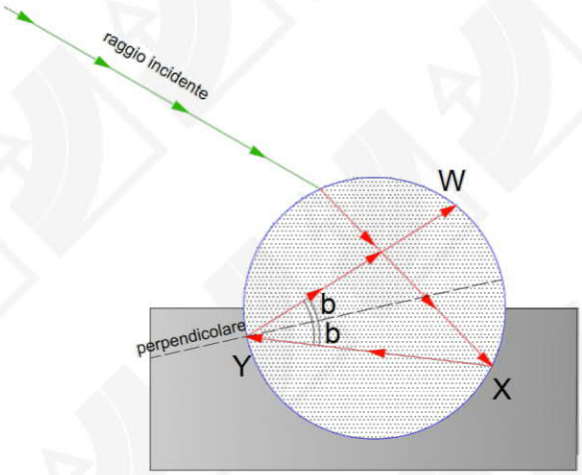


Figura 16 Raggio incidente una sfera posta su mezzo non trasmissivo - Parte 3.

Inciderà quindi, nuovamente la superficie della sfera nel punto W, uscendo finalmente assumendo l'angolo di ingresso iniziale (30°) rispetto alla superficie perpendicolare al punto W.

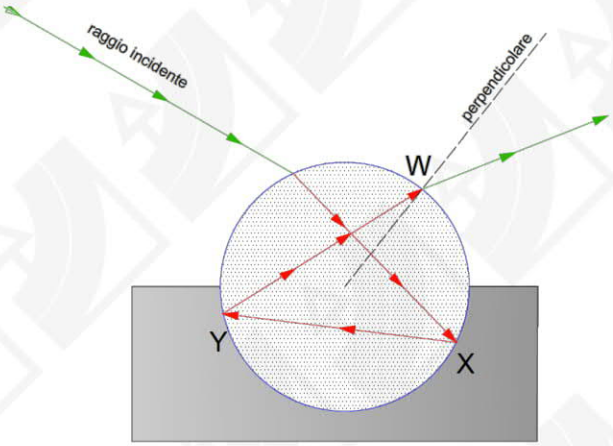


Figura 17 Raggio incidente una sfera posta su mezzo non trasmissivo - Parte 4.

Il supporto della sfera in materiale non trasmissivo è quindi in grado di condizionare notevolmente il percorso del raggio luminoso che la incide, sia per quanto riguarda il fenomeno della rifrazione che per il fenomeno della riflessione.

Si fa notare come il presente esempio non sia rappresentativo della situazione ideale, in cui il fascio di luce emesso dall'utente ritorna nella sua direzione. Affinché l'utente possa infatti vedere la striscia segnaletica, il raggio "che esce dalla sfera" dopo la serie di rimbalzi dovrà infatti tornare verso la fonte di illuminamento.

studi - progettazioni - consulenze
Cap. Soc. € 300.000,00 i.v.
p. iva/cod. fisc. 01854400981
r.e.a. n. 361323 - reg. imp. brescia n. 01854400981

via Prade, 37
25041 Boario Terme (BS)
Tel. 0364.46272 - Fax 0364.466574
www.siasspa.it - info@siasspa.it - sias@pec.it

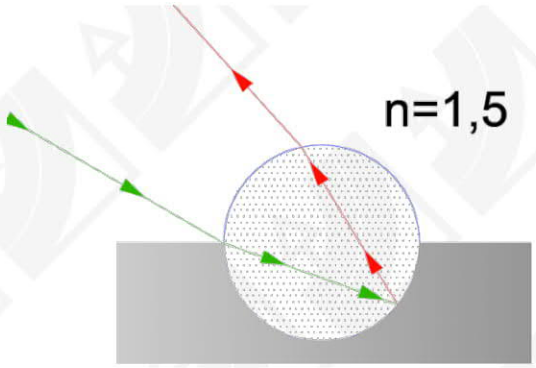


Figura 18 Raggio incidente una sfera posta su mezzo non trasmissivo - Parte 5.

Si devono pertanto verificare alcune condizioni affinché il raggio torni verso la fonte di emissione. I parametri che incidono, e che possiamo di seguito verificare, a parità di coefficiente di rifrazione, sono relativi agli angoli di incidenza.

Per far questo analizziamo cosa succede ad un raggio che incide su una striscia segnaletica, verificando nello specifico la situazione di una sfera completamente emergente dalla matrice (a sinistra in Figura 19) e di una parzialmente affondata nella superficie (a destra).

Figura 19 Microsfera completamente emergente e microsfera parzialmente affondata.

Come già discusso, la striscia segnaletica risulta ben visibile dall'utente solo nel caso in cui, in seguito "alle giuste" riflessioni e rifrazioni, il raggio di luce emesso dai fanali ritorni verso la fonte emittente, in particolare con un angolo tale da rientrare nel campo visivo dell'osservatore.

Primo caso: microsfera completamente emergente dalla matrice (Figura 20).
Si consideri una serie di raggi emessi da un'automobile ad una distanza di 30 metri (angolo incidente di 1,24°, Figura 7) che investono la microsfera. A causa del diverso indice di rifrazione questi verranno rifratti all'interno della stessa (colore rosso) e usciranno in modo apparentemente caotico

studi - progettazioni - consulenze
Cap. Soc. € 300.000,00 i.v.
p. iva/cod. fisc. 01854400981
r.e.a. n. 361323 - reg. imp. brescia n. 01854400981
via Prade, 37
25041 Boario Terme (BS)
Tel. 0364.46272 - Fax 0364.466574
www.siasspa.it - info@siasspa.it - sias@pec.it

(seguendo la legge di Snell), perdendosi oltre la stessa. Come si può facilmente notare nessun raggio ritorna verso la fonte di emissione.

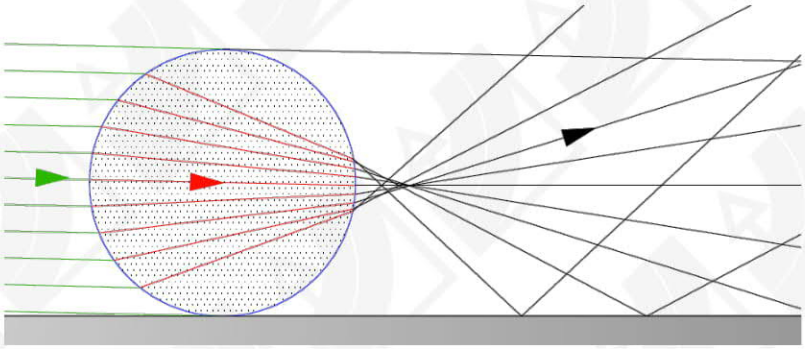


Figura 20 Microsfera completamente emergente dalla matrice.

Si potrebbe quindi affermare che una microsfera così "appoggiata" sulla matrice sia poco utile. Se la microsfera viene vista "singolarmente" l'affermazione è corretta.

Secondo caso: microsfera parzialmente affondata nella matrice (Figura 21).
La figura mette in evidenza come il raggio entrante (sempre con inclinazione di 1,24°) in una microsfera parzialmente immersa nel termoplastico comporti una serie di riflessioni e rifrazioni che non conducono il raggio uscente all'osservatore (colore nero). Anche in questo caso "singolo" il fascio luminoso non ritornerà nel campo visivo dell'osservatore.

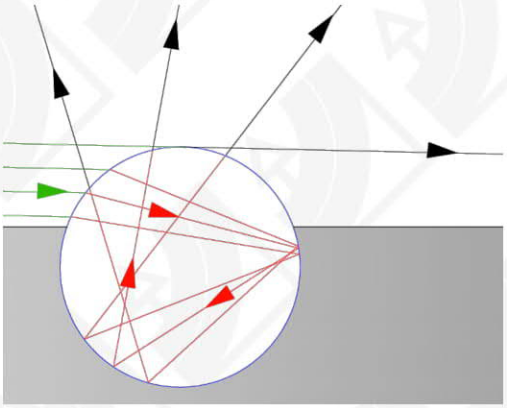


Figura 21 Microsfera parzialmente affondata nella matrice.

In realtà, come è facile comprendere, non è sufficiente analizzare il comportamento "singolo" della microsfera, bensì bisogna analizzarla in tutto il complesso. In Figura 22 è illustrato un esempio, ipotizzando la presenza di 2 microsfere vicine. Come si può notare, l'effetto della presenza nelle vicinanze di un'altra microsfera consente il ritorno del raggio verso la fonte.

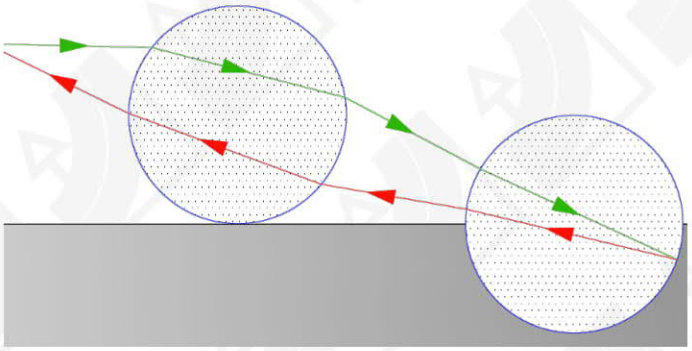


Figura 22 Complesso di microsfere.

Si potrebbe quindi asserire che: affinché vi sia riflessione del fascio di luce prodotto da un utente posizionato a 30 metri dalla striscia segnaletica, si necessita di alcune microsfere non completamente immerse che funzionino da "concertatori" per le altre.

Questa affermazione trova tuttavia la propria negazione a causa di un aspetto slegato dalla fisica ottica. Da un lato è infatti impossibile realizzare operativamente un'alternanza di microsfere completamente emergenti e parzialmente inglobate. Per di più le prime, prive di un ancoraggio stabile in corrispondenza della matrice, risulterebbero facilmente abradibili e quindi poco durevoli.

Risulta pertanto necessario definire le condizioni migliori di una serie di microsfere - in termini di qualità e di metodo di posa - per poter far sì che il flusso di luce emesso possa ritornare alla sorgente.

4 LE VARIABILI

In riferimento alla singola microsfera, gli elementi principali che caratterizzano il ritorno del fascio luminoso al mittente sono:

- L'indice di rifrazione;
- Il grado di affondamento nel supporto;
- Il diametro.

Nel presente capitolo tali elementi verranno analizzati nel dettaglio.

4.1 INDICE DI RIFRAZIONE

In precedenza si è esposto come, sulla base della Legge di Snell, un raggio proveniente da un mezzo (aria, n=1) una volta incisa una superficie caratterizzata da un indice di rifrazione "n" diverso, subisca una serie di deviazioni più o meno accentuate a causa dei fenomeni di riflessione e rifrazione. In particolare, la Figura 23 mostra come, al crescere del valore dell'indice di rifrazione del mezzo, il raggio tenda a "chiudersi" verso la perpendicolare al raggio nel punto di incidenza.

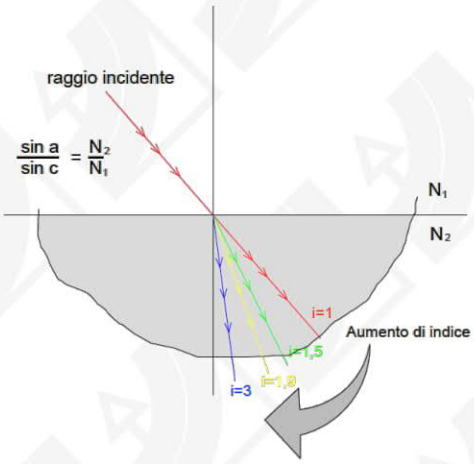


Figura 23 Cambio di direzione del raggio incidente in funzione della variazione dell'indice di rifrazione.

L'immagine riportata in seguito mostra perché all'interno dell'ambito della segnaletica orizzontale siano preferibili materiali con indice di rifrazione più elevato.

A fronte infatti del medesimo raggio incidente (verde) per tutte le microsfere - identiche per dimensioni - si nota come la direzione di ritorno del raggio rifratto (rosso) vari in funzione dell'indice di rifrazione del materiale.

Il fatto che per essere ben visto il raggio di ritorno dovrebbe avere un'inclinazione poco variabile rispetto al raggio d'andata (da 1,24° a 2,29°) consente di affermare che l'aumento dell'indice di rifrazione del materiale della microsfera determina una minor variazione dell'inclinazione del raggio luminoso, diminuendo quindi la dispersione dello stesso in arrivo dall'utente.

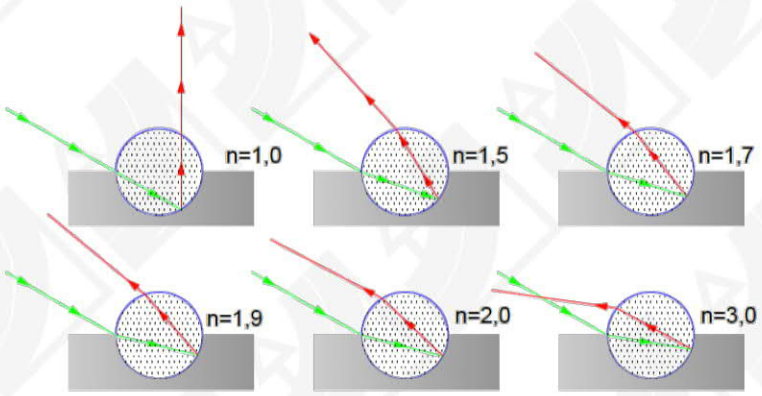


Figura 24 Variazione della direzione del raggio al variare dell'indice di rifrazione.

4.2 GRADO DI AFFODAMENTO DELLA MICROSFERA NEL SUPPORTO

Il grado di affondamento ideale per una microsfera, compreso tra il 50% (valore migliore) e il 66%, è determinato sulla base di considerazioni di natura trigonometrica, omesse tuttavia per sintesi nel presente ambito di indagine. Si riporta in Figura 25 lo schema di indagine, sulla base del quale è stato elaborato dalla scrivente un foglio di calcolo. Sulla base di condizioni plausibili - a parità di altre condizioni - indice di rifrazione e diametro della microsfera - sono state analizzati i rapporti tra le possibili superfici di ingresso dei raggi luminosi (in verde in Figura 26) e le relative potenziali superfici riflettenti (in rosso).

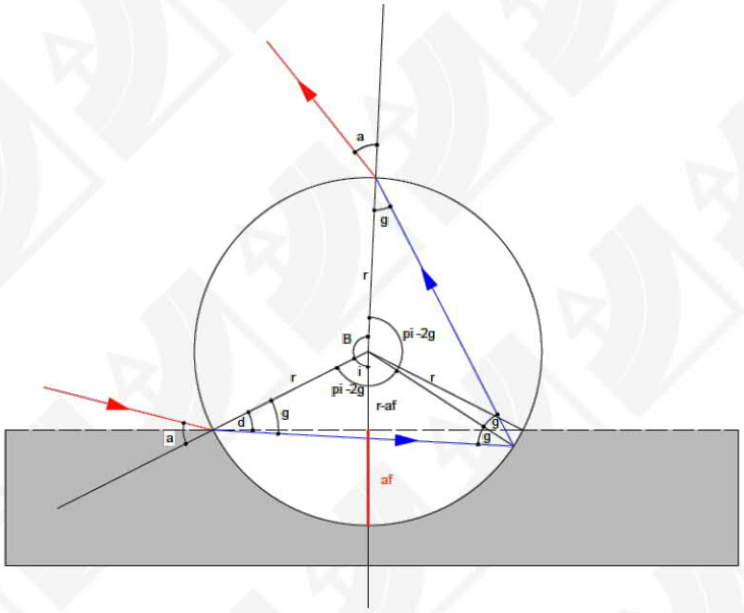


Figura 25 Considerazioni trigonometriche.

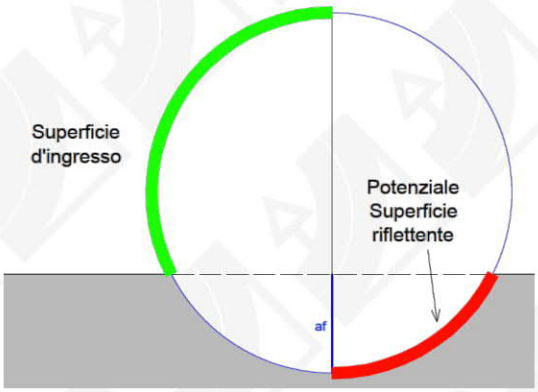


Figura 26 Superficie di ingresso e superfice potenziale riflettente.

Prendendo in considerazione le superfici coinvolte nel fenomeno fisico della rifrazione della microsfera indicati in Figura 26, affinché i raggi entranti riescano nuovamente ad uscire dalla stessa superficie (in verde) in direzione dell'occhio dell'osservatore, gli stessi devono "impattare" sulla superficie "potenziale riflettente" (in rosso).

Tale quadrante è quindi potenzialmente delegato alla ricezione dei raggi per rifletterti, comportandosi da "specchio". Tuttavia, per considerazioni di natura geometrica, solo una parte di tale superficie risulta veramente idonea a riflettere i raggi in entrata.

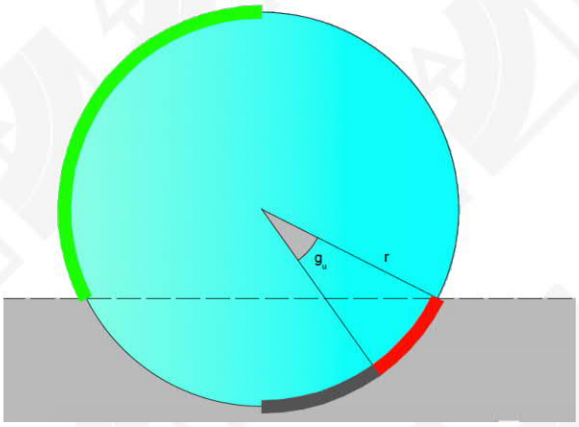
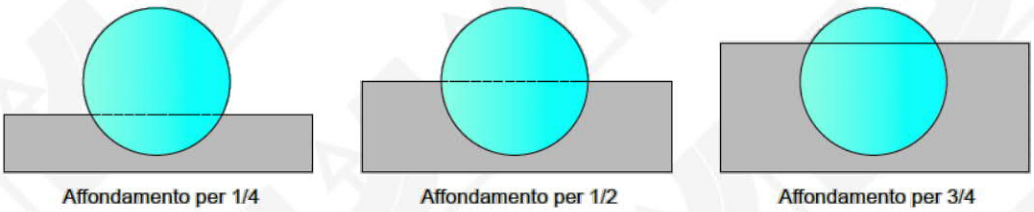


Figura 27 Superficie d'ingresso e superficie riflettente.

Sulla base del foglio di calcolo elaborato è possibile mettere in evidenza il rapporto tra le superfici d'ingresso e di entrata (semplificate ad archi nella trattazione bidimensionale in esame).



studi - progettazioni - consulenze
Cap. Soc. € 300.000,00 i.v.
p. iva/cod. fisc. 01854400981
r.e.a. n. 361323 - reg. imp. brescia n. 01854400981

via Prade, 37
25041 Boario Terme (BS)
Tel. 0364.46272 - Fax 0364.466574
www.siasspa.it - info@siasspa.it - sias@pec.it

Dati	Affondato per 1/4	Affondato per 1/2	Affondato per 3/4	UM
Cefficiente rifrazione	1,5	1,5	1,5	-
Diametro microsfera	1	1	1	mm
Raggio	0,5	0,5	0,5	mm
Affondamento	0,25	0,5	0,75	mm
lunghezza arco entrante	1,05	0,79	0,52	mm
angolo uscita max "gu"	11,81	41,81	11,81	gradi
lunghezza arco uscita	0,103	0,365	0,103	mm
rapporto uscita/entrata	9,84%	46,46%	19,68%	%

Si nota immediatamente che la condizione migliore è quella che prevede un affondamento del 50% (affondata per 1/2), con un rapporto tra superficie potenziale utile e superficie ricevente pari al 46,46%. Negli altri due casi la superficie in grado di riflettere la luce entrante invece si riduce.
Effettuando le analisi nel caso del 50% e del 66% di cui si scriveva all'inizio del paragrafo si individuano i seguenti risultati:

Dati	Affondato per 50%	Affondato per 66%	UM
Cefficiente rifrazione	1,5	1,5	-
Diametro microsfera	1	1	mm
Raggio	0,5	0,5	mm
Affondamento	0,5	0,666	mm
lunghezza arco entrante	0,79	0,62	mm
angolo uscita max "gu"	41,81	22,42	gradi
lunghezza arco uscita	0,365	0,196	mm
rapporto uscita/entrata	46,46%	31,75%	%

Si noti come a fronte di circa il 47% (relativamente ad una microsfera affondata per metà) si passi al 32% (per una sfera affondata per 2/3).
La condizione - teorica - migliore in termini di retroriflettenza è data quindi da un affondamento delle microsfere nell'ordine del 50%.

Il grafico seguente mette invece in luce l'andamento - fortemente non lineare - dell'andamento della superficie di riflessione in funzione del grado di affondamento. In esso si riscontra il rapido decadimento della superficie di riflessione per valori di affondamento superiori al 50%, in corrispondenza del quale, come anticipato, si raggiunge il valore di picco.

studi - progettazioni - consulenze
Cap. Soc. € 300.000,00 i.v.
p. iva/cod. fisc. 01854400981
r.e.a. n. 361323 - reg. imp. brescia n. 01854400981
via Prade, 37
25041 Boario Terme (BS)
Tel. 0364.46272 - Fax 0364.466574
www.siasspa.it - info@siasspa.it - sias@pec.it

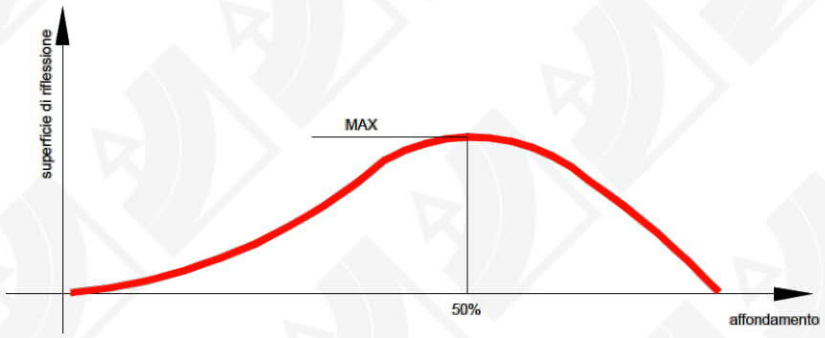


Figura 28 Grafico superficie di riflessione-affondamento.

Si ricorda come, seppur nella presente trattazione si abbia sempre fatto riferimento ad una geometria piana, la realtà sia invece rappresentata da una superficie sferica tridimensionale, come quella rappresentata nella seguente figura.

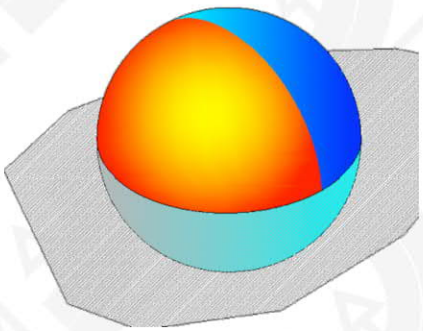


Figura 29 Geometria "reale".

Nell'immagine viene raffigurata una microsfera immersa nel supporto (nella parte celeste) per il 50%. Il fascio di raggi incidenti potrà inciderla in corrispondenza di tutta la superficie arancione; in seguito ai fenomeni di rifrazione e riflessione analizzati i raggi si concentreranno sulla superficie opposta a quella d'ingresso. In corrispondenza di essa, solamente una parte sarà in grado tuttavia di restituire i raggi all'utente. Questa è illustrata in Figura 30.

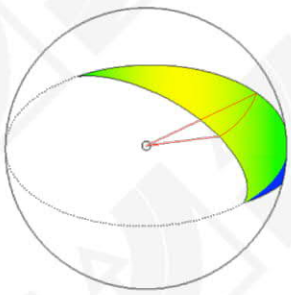


Figura 30 Superficie riflettente.

studi - progettazioni - consulenze
Cap. Soc. € 300.000,00 i.v.
p. iva/cod. fisc. 01854400981
r.e.a. n. 361323 - reg. imp. brescia n. 01854400981
via Prade, 37
25041 Boario Terme (BS)
Tel. 0364.46272 - Fax 0364.466574
www.siasspa.it - info@siasspa.it - sias@pec.it

4.3 DIAMETRO

Le considerazioni sinora effettuate hanno riguardato le porzioni di superfici che sono in grado di ricevere, rifrangere e riflettere il fascio di raggi entranti nella microsfera.
A tal proposito può essere d'interesse la valutazione delle stesse. L'operazione può essere effettuata con l'aiuto della seguente equazione:

$$S = \frac{3.14 \cdot R^2 \cdot a}{90}$$

Con "a" angolo (in gradi) che sottende la superficie ed R raggio della microsfera.
È facile comprendere come per una microsfera più grande anche la superficie ricevente risulti più grande, e pertanto anche quella riflettente. Di conseguenza, maggiore è la "quantità di luce" ricevuta dalla microsfera, maggiore risulterà la quantità di ritorno all'emittente. In particolare, essendo la superficie potenzialmente riflettente data dal quadrato del raggio, è chiaro che raddoppiare il raggio di una microsfera quadruplica la superficie di potenziale retroriflettenza della stessa.

Effettuando un confronto a parità di altre condizioni, affondamento e indice di riflessione, si ottengono i risultati esposti in seguito:

Dati	microsfera 0,5 mm	microsfera 1 mm	microsfera 1,5 mm	microsfera 2 mm	UM
Cefficiente rifrazione	1,5	1,5	1,5	1,5	-
Diametro microsfera	0,5	1	1,5	2	mm
Raggio	0,25	0,5	0,75	1	mm
Affondamento	50%	50%	50%	50%	%
Superficie entrante	0,262	1,047	2,356	4,189	mmq
Superficie uscente	0,026	0,103	0,232	0,412	mmq
Rapporto uscita/entrata	9,84%	9,84%	9,84%	9,84%	%
Variazione superficie potenziale					
Sfera di riferimento 1 mm	25,00%	100,00%	225,00%	400,00%	%

4.4 SINTESI

I concetti esposti nel presente capitolo possono essere riassunti con estrema sintesi nelle seguenti proposizioni, in grado di accompagnare la scelta della miscela di microsfere da adottare:

- Il grado di affondamento ideale per una microsfera è pari al 50%, indipendentemente dal tipo di matrice (vernice, termospruzzato, termocolato o pellicola). Per tale valore la capacità di riflessione è massima. Nel caso reale, ossia di impossibilità nel raggiungimento del valore esatto pari al 50%, è preferibile l'ottenimento di un grado di affondamento maggiore;
- Più è elevato l'indice di rifrazione del materiale più una microsfera permette, in condizioni ideali, di concentrare meglio il raggio uscente verso l'origine, minimizzando le dispersioni;

studi - progettazioni - consulenze
Cap. Soc. € 300.000,00 i.v.
p. iva/cod. fisc. 01854400981
r.e.a. n. 361323 - reg. imp. brescia n. 01854400981

via Prade, 37
25041 Boario Terme (BS)
Tel. 0364.46272 - Fax 0364.466574
www.siasspa.it - info@siasspa.it - sias@pec.it

- Maggiore è il diametro della microsfera maggiore è la potenziale superficie di retroriflettenza. Tale superficie varia infatti con il quadrato del diametro: a parità di altre condizioni una microsfera con il doppio del diametro rispetto ad un'altra garantisce una superficie potenziale di retroriflessione 4 volte superiore.

5 ESEMPIO: MICROSFERE PER MATRICE IN VERNICE

Si effettua ora un esempio di determinazione delle microsfere ideali da post-spruzzare in corrispondenza di una matrice di vernice.

Si ipotizzi di stendere della vernice al solvente con una densità di 600g/m^2. Conoscendo le caratteristiche tecniche della vernice e la resa della stessa, riportati in Tabella 1, si individua uno spessore medio secco del film di vernice pari a 0,27mm, arrotondato per comodità di calcolo a 0,3mm, ossia 300 micron.

Peso specifico vernice	1.80 kg/l
Residuo secco	80%
Ipotesi di stesura (ad umido)	600 g/m^2
Spessore al m^2 (a secco)	0,27mm

Tabella 1 Definizione dello spessore del film secco.

La scelta del tipo di microsfere da impiegare parte dalla considerazione che il raggio delle microsfere non deve risultare troppo elevato rispetto allo spessore della matrice. Si potrebbe asserire infatti che, dalle analisi svolte in precedenza, la microsfera ideale dovrebbe avere un raggio esattamente pari allo spessore del supporto.

Uno scostamento da tale valore, dato dall'impiego di microsfere con un diametro maggiore, caratterizzate quindi da un minor grado di affondamento, comporterebbe una superficie di riflessione minore (parte a sinistra del picco, Figura 28), diminuendo quindi il rendimento retro-riflettente della segnaletica. La situazione discussa è rappresentata fisicamente in Figura 31.

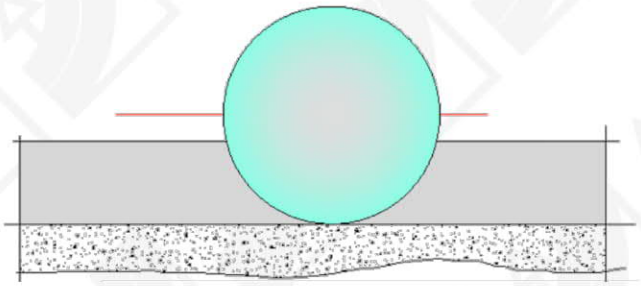


Figura 31 Microsfera con raggio maggiore dello spessore della matrice.

Nella tabella proposta in seguito vengono indicati i valori del rapporto uscita/entrata per microsfere con diametri diversi (800µm, 700µm, 600µm, 500µm) e parità di altre condizioni.

Diametro microsfera	800µm	700µm	600µm	500µm
Raggio microsfera	0.4mm	0.35mm	0.3mm	0.25mm
Coefficiente di rifrazione	1.5	1.5	1.5	1.5
Affondamento	0.3	0.3	0.3	0.3

Rapporto uscita/entrata	26%	34%	46%	39%

Tabella 2 Valori di resa per microsfere con diversi diametri.

Il riscontro appare evidente: il maggior grado di resa viene ottenuto per microsfere di diametro 600µm. Nella seguente immagine è rappresentato, per ciascun diametro, il rispettivo punto in relazione al valore massimo.

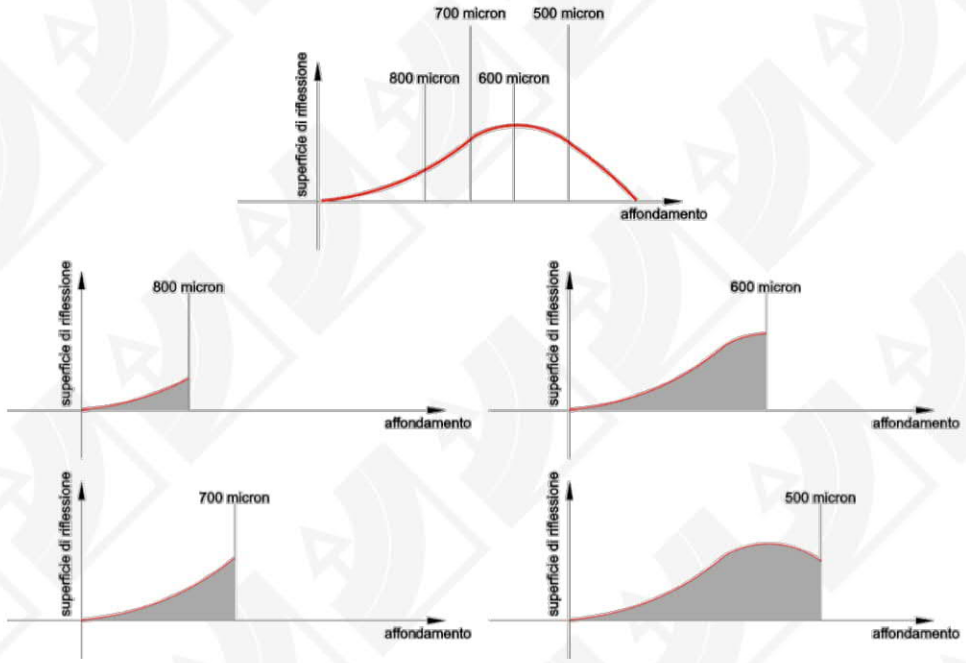


Figura 32 Superfice di riflessione in funzione del diametro, esempi.

6 LA SCHEDA TECNICA: IL RANGE GRANULOMETRICO

Dopo aver analizzato il rapporto ottimale tra lo spessore del supporto (matrice) e il diametro della microsfera, individuando la soluzione ottimale in microsfere con raggio coincidente con lo spessore del supporto, prendiamo ora in esame la reale composizione granulometrica di una miscela di microsfere tra quelle presenti all'interno del panorama commerciale.

Le microsfere presentano all'interno della denominazione, oltre al nome del produttore e al codice del trattamento subito durante la fabbricazione, una coppia di valori numerici (ad esempio 180-850, 300-600, 125-600, 90-425).
Questo codice rappresenta, secondo normativa, la maglia del setaccio nominale inferiore (che deve trattenere, per definizione, dal 95% al 100% in massa delle microsfere), e la maglia del setaccio nominale superiore (che deve trattenere dallo 0% al 10%).
Prendendo quindi in esame una miscela 180-850, la denominazione indica che per la stessa il setaccio nominale inferiore ha maglie da 180µm = 0,18mm ed il setaccio nominale superiore ha maglie da 850µm, ossia 0,85 mm. Si precisa inoltre come 850µm non sia tuttavia il diametro massimo delle microsfere presenti all'interno della miscela analizzata.
Ma quante di quelle presenti nella miscela sono da 180 µm? E quante da 850 µm? Sono solo due i diametri presenti? Se la risposta è negativa, quali altri diametri sono presenti? E in che quantità?
L'analisi della scheda tecnica può dare risposta ai quesiti.
Tra i dati riportati, è presente il "*sieving range*", ossia il range granulometrico della specifica miscela, definito secondo la norma UNI EN 1423:2012 "Materiali per segnaletica orizzontale - Materiali da postspruzzare - Microsfere di vetro, granuli antiderapanti e loro miscele".
Si riporta l'esempio di un campione di tipo 180-850.

Beads
drop on blends

sieve size [µm]	accumulated retainment %
1000	0-2
850	0-10
600	5-20
425	20-60
300	70-90
180	95-100

Figura 33 Stralcio di scheda tecnica [SWARCO SOLIDPLUS 15 180-850 T14]

I valori numerici a sinistra rappresentano le aperture delle maglie dei setacci (1000µm, 850µm, 600µm, 425µm, 300µm e 180µm) predisposti per l'attraversamento di un campione di miscela di massa nota. I valori percentili a destra "*accumulated retainment*" non sono altro che le percentuali in termini di massa - minime e massime - delle microsfere trattenute da quel setaccio.

L'operazione di setacciatura avviene secondo le seguenti modalità.

Posizionando il campione sul setaccio più alto, caratterizzato dalla maglia più ampia (1000µm =1mm), le microsfere passeranno, o verranno trattenute, dalla maglia i-esima in funzione del rapporto tra il diametro delle stesse e l'apertura del setaccio.

Effettuando diverse prove su campioni della stessa tipologia di miscela, su ognuno dei setacci si fermerà una quantità di microsfere caratterizzate da un valore del diametro superiore a quello delle maglie che lo costituiscono. Il valore della massa degli elementi che si fermano su ogni setaccio verrà definito "massa accumulata", mentre quello relativo alle microsfere che l'attraversano si chiamerà "massa passante".

L'operazione di setacciatura viene effettuata per ciascun setaccio, fino ad arrivare all'ultimo, dove qualche microsfera potrebbe passare, in quanto caratterizzata da un diametro minore dell'apertura della maglia.

Nell'esempio si può notare che al setaccio con maglie da 1000µm si accumuleranno dallo 0% al 2% in termini di massa.

Un errore "comune" potrebbe essere quello di interpretare il valore 20%-60% (relativo al setaccio con maglie da 425µm) come il fatto che il 20% (o 60%, a seconda del valore analizzato) delle microsfere presenti nella miscela abbia un diametro superiore o uguale a 425µm.

Come anticipato, i valori indicati a destra in Figura 33 non sono altro che i valori percentili in massa - minimi e massimi - di microsfere trattenute da quel setaccio. Riassumendo i valori in una tabella:

Maglia setaccio [µm]	*accumulated retainment (massimo)*	*accumulated retainment (massimo)* [%]
1000	0	2
850	0	10
600	5	20
425	20	60
300	70	90
180	95	100

Prendendo in esame un determinato setaccio (ad esempio quello con maglie da 850 µm, indicato in grigio), in esso viene trattenuta (considerando i valori massimi) una quantità di microsfere pari all'8% (10% - 2%). Il numero indicato sulla riga è infatti la massa "cumulata", data dalla somma delle masse trattenute dai setacci posti anche al di sopra. La Figura 34 può aiutare nella comprensione del fenomeno.

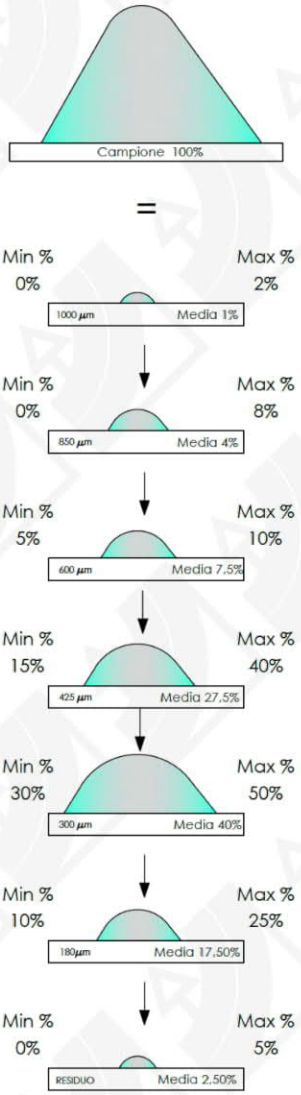


Figura 34 Setacciatura di una miscela, esempio.

La tabella seguente riassume, per ciascun setaccio, il valore in percentile della massa effettivamente trattenuta.

Maglia setaccio [µm]	*accumulated retainment (massimo)* [%]	Percentuale effetivamente trattenuta *(minimo)* [%]
1000	2	2
850	10	10 - 2 = 8
600	20	20 - 10 = 10
425	60	60 - 20 = 40
300	90	90 - 60 = 30
180	100	100 - 90 = 10

studi - progettazioni - consulenze
Cap. Soc. € 300.000,00 i.v.
p. iva/cod. fisc. 01854400981
r.e.a. n. 361323 - reg. imp. brescia n. 01854400981
via Prade, 37
25041 Boario Terme (BS)
Tel. 0364.46272 - Fax 0364.466574
www.siasspa.it - info@siasspa.it - sias@pec.it

Il medesimo ragionamento può essere effettuato sul valore minimo:

Maglia setaccio [µm]	*accumulated retainment (minimo)*	Percentuale effettivamente trattenuta *(minimo)* [%]
1000	0	0
850	0	0 - 0 = 0
600	5	5 - 0 = 5
425	20	20 - 5 = 15
300	70	70 - 20 = 50
180	95	95 - 70 = 25

Facendo un po' di ordine tra i valori minimi e massimi per ogni setaccio e valutandone la media si può analizzare la composizione media del campione di microsfere:

Maglia setaccio [µm]	Percentuale effettivamente trattenuta *(minimo)* [%]	Percentuale effettivamente trattenuta *(minimo)* [%]	Percentuale effettivamente trattenuta *(media)* [%]
1000	0	2	1
850	0	8	4
600	5	10	7,5
425	15	40	27,5
300	30	50	40
180	10	25	17,5
< 180			2,5
TOTALE			**100**

La tabella sopra esposta dimostra, contrariamente a quanto poteva sembrare all'inizio, come la percentuale maggiore sia rappresentata (per il 40%) da microsfere con diametro compreso tra 300 e 425 micron, e non che il 40% (media tra 60%-20%) si fermi al setaccio 425.

Analizzando quindi la miscela di microsfere 180-850 presa come esempio si può asserire che per un supporto da circa 0,3mm (striscia in vernice):

- Il 60% in massa delle microsfere (2,5% + 17,5% + 40% = 60%) saranno completamente immerse all'interno della matrice, in quanto caratterizzate da un diametro inferiore o uguale (<180µm, 180µm, 300µm =0,3mm) allo spessore del supporto (0,3mm). Queste tenderanno a staccarsi dal supporto soltanto quando la vernice inizierà a consumarsi;
- Il 27,5% in massa delle microsfere emergerà di circa il 30% ((425µm - 300µm) / 450µm = 0,28), quindi con un grado di affondamento del 70%;
- Il 7,5%, ossia le microsfere da 600µm, emergeranno per il 50%;
- Le altre microsfere, con diametro superiore, saranno invece inutili dal punto di vista della retroriflettenza per le questioni esposte in precedenza.

studi - progettazioni - consulenze
Cap. Soc. € 300.000,00 i.v.
p. iva/cod. fisc. 01854400981
r.e.a. n. 361323 - reg. imp. brescia n. 01854400981

via Prade, 37
25041 Boario Terme (BS)
Tel. 0364.46272 - Fax 0364.466574
www.siasspa.it - info@siasspa.it - sias@pec.it

Si specifica che il presente discorso non prende in disamina altri aspetti che invece influenzano il fenomeno, quali la spinta di Archimede e la viscosità del materiale che può impedire o favorire il galleggiamento delle sfere.
La scelta del miglior mix design, in relazione alla tipologia di materiale del supporto e alle esigenze necessarie, gli accorgimenti da adottare per ogni tipologia di materiale di supporto, la differenza tra microsfere premiscelate e post-spruzzate troveranno infatti luogo in una dispensa dedicata.