

# L'isolamento termico dei vetrocamera con gas

## Considerazioni controintuitive sull'isolamento termico dei vetrocamera con gas

**Autori Antonio Daneo, Alberto D'Este**  
**Stazione Sperimentale del Vetro, Murano Venezia**



Il vetro viene usualmente considerato un materiale termicamente isolante: la sua conducibilità termica è di circa  $1 \text{ W/m K}$ , paragonabile a quella di un mattone.

In edilizia il vetro viene normalmente utilizzato in lastre di spessore molto piccolo, tipicamente da 4 a 8 mm, e quindi l'isolamento termico che può fornire una singola lastra non è molto elevato. La norma di riferimento per il calcolo della trasmittanza termica, il cosiddetto valore- $U_g$ , per il vetro in edilizia è la UNI-EN 673: 2005 "Vetro per edilizia – Determinazione della trasmittanza termica (U-value) – Metodo di

calcolo". Per consentire il confronto tra vetrate composte con prodotti diversi, questa norma stabilisce i seguenti valori per le condizioni al contorno:

- temperatura media dell'intercapedine:  $10^\circ\text{C}$  (283 K);
- differenza di temperatura fra le superfici di vetro, esterno ed interno, che si affacciano all'intercapedine:  $15^\circ\text{C}$
- coefficiente di adduzione esterna:  $23 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ;
- coefficiente di adduzione interna:  $8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ .

Questa norma si riferisce ai soli prodotti in vetro e quindi non considera l'influenza di elementi "estranei" quali il canalino distanziatore o il telaio che pure hanno un peso nel computo del coefficiente di scambio termico di una finestra.

La norma UNI EN 673:2005 propone delle formule semplificate e delle condizioni al contorno specifiche: per la determinazione dei valori di trasmittanza termica in condizioni di reale impiego sarebbe necessario ricorrere a sistemi di modellazione molto più complessi il cui utilizzo esula dallo scopo di questo articolo. Tutti i valori  $U_g$  di seguito riportati sono stati calcolati in conformità alla norma UNI-EN 673:2005.

## 2. Le vetrate isolanti

Una vetrata monolitica ha una trasmittanza termica di  $5.8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  per uno spessore di 4 mm che diventano  $5.7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  per uno spessore di 8 mm. Per migliorare l'isolamento di una vetrata è quindi pressoché inutile agire sullo spessore della lastra: è necessario utilizzare un materiale con caratteristiche isolanti molto più spinte, ma che, tuttavia, non alteri le caratteristiche di trasparenza alla radiazione solare che sono il principale motivo dell'utilizzo del vetro nell'edilizia.

A tale scopo viene utilizzato uno strato di gas opportunamente intrappolato tra due lastre di vetro, ottenendo la cosiddetta vetrata isolante o vetrocamera.

Nei casi più semplici il gas utilizzato è aria, disidratata per evitare fenomeni di condensa sulle superfici interne del vetrocamera. Il valore-U di una vetrata isolante tradizionale composta da due vetri float di spessore 4 mm ed un'intercapedine di 12 mm contenente aria disidratata è di  $2.9 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ , cioè circa la metà di quella di un vetro di 8 mm di spessore.

Prestazioni migliori, in termini di riduzione del valore di trasmittanza termica, si possono ottenere sostituendo l'aria con altri gas, o miscele di gas, con minore conducibilità termica; a tale scopo vengono utilizzati gas nobili e chimicamente inerti come l'argon, il kripton e lo xenon.

Il regolamento (CE) n. 842/2006 del 17 maggio 2006 vieta l'immissione in commercio di vetrate riempite con gas ad effetto serra come l'esfluoruro di zolfo ( $\text{SF}_6$ ) finora utilizzato in alcune particolari applicazioni.

Tabella I - Proprietà dei gas a 10°C				
Gas (o miscela)	Densità kg/m <sup>3</sup>	Viscosità dinamica kg/(m.s)	Conducibilità termica W/(m.K)	Calore specifico J/(kg.K)
Aria	1.232	1.761,10 <sup>-5</sup>	2.496,10 <sup>-2</sup>	1.008,10 <sup>3</sup>
Argon	1.699	2.164,10 <sup>-5</sup>	1.684,10 <sup>-2</sup>	0.519,10 <sup>3</sup>
Krypton	3.560	2.400,10 <sup>-5</sup>	0.900,10 <sup>-2</sup>	0.245,10 <sup>3</sup>
Xenon	5.689	2.226,10 <sup>-5</sup>	0.529,10 <sup>-2</sup>	0.161,10 <sup>3</sup>

In tabella I si riportano le proprietà che hanno influenza nel calcolo della trasmissione termica dei gas normalmente utilizzati nella produzione delle vetrate isolanti.

Oltre all'aria disidratata, il gas maggiormente utilizzato nella realizzazione di vetrate isolanti è sicuramente l'argon, grazie anche ai costi contenuti, ma la richiesta dei mercati europei, tesa all'ottenimento di valori di trasmittanza termica sempre più bassi, spinge all'utilizzo del kripton (molto più costoso dell'argon, ma meno dello xenon). A causa della differenza di temperatura fra esterno ed interno nei gas contenuti nell'intercapedine possono innescarsi dei movimenti che, facilitando la trasmissione del calore fra le due lastre di vetro, peggiorano l'isolamento termico della vetrata: i moti convettivi.

In particolare, dalle equazioni riportate nella norma UNI-EN 673: 2005, può essere definito uno "spessore limite" di gas oltre il quale, in funzione della temperatura e delle caratteristiche di densità e viscosità dinamica, è favorito l'insorgere di convezione.

### 3. Fisica dei moti convettivi

La convezione naturale è provocata da moti presenti nella massa fluida per effetto di squilibri di forze provocate dallo stesso processo di trasmissione termica: all'equilibrio termico non si hanno moti convettivi. Affinché sia possibile l'instaurarsi di questi moti è necessario che vi sia un campo di forze di volume - tipicamente la forza di gravità - e che la densità del fluido dipenda dalla temperatura.

Consideriamo una parete verticale lambita da un gas a temperatura diversa. Il moto di ciascun elemento di volume in prossimità della parete sarà determinato dall'azione risultante fra la forza di gravità e la spinta archimedeica da parte del fluido circostante (dipendente dal coefficiente di espansione termica del gas e della differenza di temperatura del fluido in prossimità e lontano dalla parete) e contrastato dalle forze di attrito viscoso.

I fluidi viscosi tendono ad aderire alle pareti che li delimitano, riducendo a zero la velocità in corrispondenza del contorno. L'azione dell'adesione si trasmette progressivamente alla massa fluida per effetto delle forze viscosive, così che in prossimità dei limiti fisici del campo di moto si ha sempre un rallentamento graduale delle particelle rispetto alla corrente posta a distanza maggiore. Lo strato  $\delta$  vicino alla parete, in cui si hanno forti variazioni della velocità, è detto strato limite dinamico. All'esterno di esso il campo di velocità non risente degli effetti indotti dall'adesione del fluido alla parete e assume un andamento "indisturbato" compatibilmente con le condizioni al contorno assegnate alla corrente.

Per bassi valori del rapporto fra forze d'inerzia e forze viscosive, le particelle del fluido percorrono traiettorie ordinate, parallele le une alle altre per cui sono assenti processi di mescolamento e il deflusso è detto laminare. All'interno dello strato limite laminare, la mancanza di moti turbolenti limita lo scambio di calore al solo meccanismo di origine molecolare della conduzione termica. Inoltre, poiché le velocità del gas si possono ritenere parallele alla parete, supposta isoterma, il calore viene scambiato solo in direzione ortogonale alla parete e le variazioni di temperatura parallelamente alla parete possono ritenersi trascurabili.

Quando il rapporto fra forze d'inerzia e forze viscosive diviene elevato, le particelle di fluido seguono traiettorie tortuose, con moti caotici e casuali, per cui vi sono continui processi di mescolamento entro la corrente e il deflusso è detto turbolento. Anche quando il regime è turbolento, vi è però sempre un sottile strato aderente alla parete in cui il moto si mantiene laminare, detto sottostrato laminare; allontanandosi dalla parete il

movimento del fluido facilita il trasporto di energia per effetto del mescolamento fra particelle a temperatura prossima a quella della parete e particelle alla temperatura del fluido indisturbato.

Si può quindi ipotizzare di valutare la potenza termica scambiata tra l'unità di superficie della parete e il fluido considerando solo lo scambio conduttivo entro uno strato di fluido di ipotetico spessore  $\delta'$  che, se completamente stagnante, presenterebbe la stessa resistenza termica dello strato limite effettivo. Lo spessore dello strato limite ipotetico è legato a quello dello strato limite (termico e dinamico) in cui l'assenza di situazioni turbolente limita lo scambio di calore e di quantità di moto.

Fissate le condizioni al contorno e un parametro geometrico caratteristico,  $d$ , (per una vetrata isolante, temperature delle superfici, temperatura media del gas e spessore della cavità), il coefficiente di convezione si può esprimere in funzione della conducibilità termica del gas alla temperatura riferimento e del rapporto fra la dimensione caratteristica  $d$  e lo spessore dello strato limite ipotetico  $\delta'$ ; il rapporto  $d/\delta'$  corrisponde al gruppo adimensionale detto numero di Nusselt,  $Nu$ . Nelle intercapedini chiuse lo spessore dello strato limite ipotetico  $\delta'$  potrà essere al più pari allo spessore  $d$  dell'intercapedine ( $Nu \geq 1$ ).

Attraverso sperimentazioni estese e l'analisi teorica del processo convettivo naturale si sono individuate alcune relazioni che permettono di esprimere il numero di Nusselt in funzione delle grandezze che determinano il coefficiente di convezione. Queste correlazioni sono del tipo

$$Nu = A \cdot (Gr \cdot Pr)^m$$

in cui:

- $A$  e  $m$  sono costanti che, nel caso di vetrocamera verticali, valgono:  $A = 0.035$ ,  $m = 0.38$ ;
- le grandezze che influenzano i moti convettivi (densità  $\rho$ , viscosità dinamica  $\mu$ , coefficiente di espansione termica, differenza di temperatura  $\Delta T$ ) sono inglobate nel gruppo adimensionale detto numero di Grashof,  $Gr$ :

$$Gr = \frac{d^3 \cdot \rho^2 \cdot \frac{1}{T_\infty} \cdot g \cdot \Delta T}{\mu^2}$$

- le proprietà fisiche del fluido direttamente influenzanti il trasporto di calore (conduttività termica  $\lambda$ , calore specifico  $c_p$ ) sono inglobate nel gruppo adimensionale detto numero di Prandtl,  $Pr$ :

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda}$$

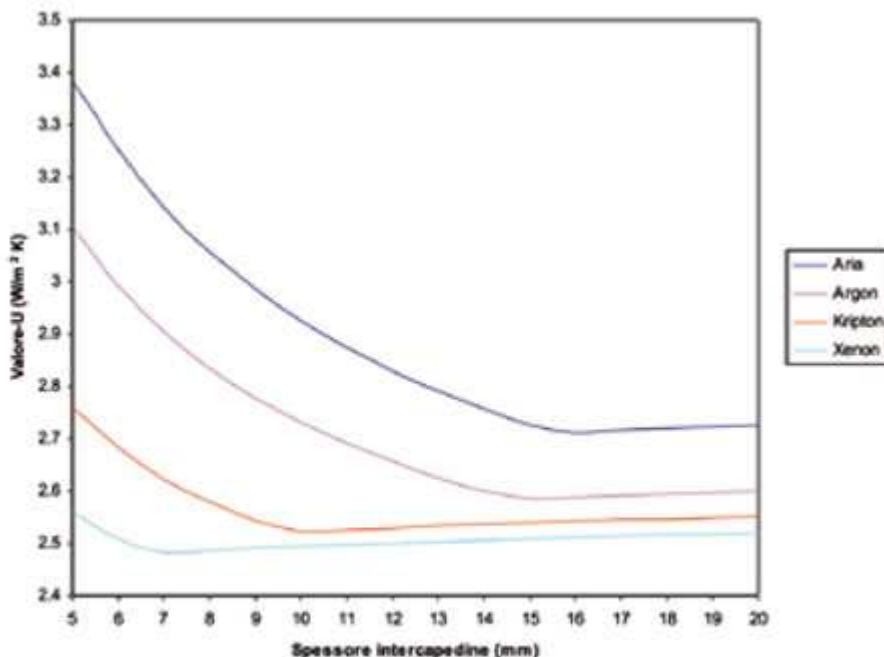
Risulta quindi che, fissate la temperatura di riferimento  $T_\infty = 283$  K e la differenza di temperatura fra le facce  $\Delta T = 15$  K, per ciascun gas vi è uno spessore dell'intercapedine  $d^*$  in corrispondenza del quale  $Nu = 1$ ; minore è la viscosità cinematica del gas, minore sarà il valore di  $d^*$ .

Con spessori dell'intercapedine  $d$  inferiori a  $d^*$ , la trasmittanza termica aumenta per effetto della riduzione della resistenza termica conduttiva mentre con spessori dell'intercapedine superiori a  $d^*$ , la trasmittanza termica aumenta per effetto dell'insorgere di moti convettivi.

Questo fenomeno non influisce in alcun modo sulla componente radiativa della trasmissione del calore che resta perciò invariata al variare del gas di riempimento o dello spessore dell'intercapedine. La componente radiativa della trasmissione termica può essere modificata mediante l'utilizzo di strati sottili di materiali basso-emissivi.

#### 4. Calcolo secondo UNI EN 673 2005

##### 4.1. Vetrocamera ad una intercapedine



*Figura 1 – Valore U di un vetrocamera 6/gas/6 in funzione dello spessore dell'intercapedine.*

In figura 1 sono riportati i valori secondo UNIEN 673 della trasmittanza termica di un vetrocamera composto da due vetri float non rivestiti da 6 mm in funzione dello spessore dell'intercapedine e del gas di riempimento. Si nota che, come è logico attendersi, aumentando lo spessore di gas a bassa conducibilità termica il valore-U diminuisce. C'è però uno spessore superato il quale l'isolamento termico non migliora ulteriormente ma, anzi, tende addirittura leggermente a peggiorare.

È in corrispondenza a questo spessore, variabile in funzione della differenza di temperatura fra le facce delle lastre che racchiudono l'intercapedine e delle proprietà del gas di riempimento, che hanno inizio i moti convettivi il cui effetto negativo è superiore a quello positivo dell'aumento di spessore di gas isolante.

Ciò in pratica rende inutile, dal punto di vista dell'isolamento termico, costruire vetrate isolanti con spessore dell'intercapedine superiore allo "spessore limite".

La possibilità che si generino moti convettivi nel gas dell'intercapedine dovrebbe essere considerata anche in caso di riempimento con miscele di gas.

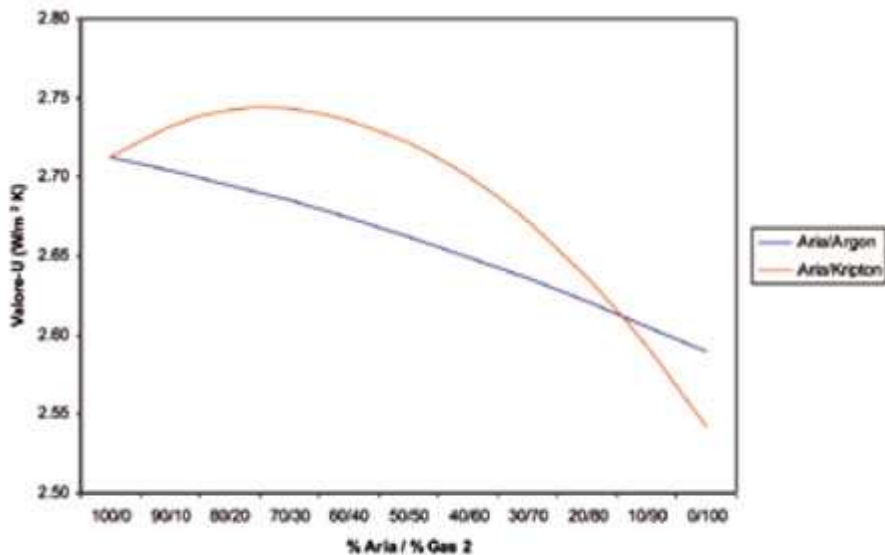


Figura 2 – Valore U di un vetrocamera 6/16/6 al variare della miscela di gas.

Nella figura 2 è riportato come varia il valore U sostituendo progressivamente l'aria con un altro gas con conducibilità inferiore (argon o kripton) nell'intercapedine di un vetrocamera 6/16/6.

Si nota che, mentre all'aumentare della concentrazione di argon si ottiene un continuo miglioramento dell'isolamento termico, la sostituzione di aria con percentuali via via crescenti di kripton, più isolante dell'argon, ma con minor viscosità cinematica e quindi maggior propensione a generare moti convettivi, provoca, almeno inizialmente, un peggioramento dell'isolamento termico.

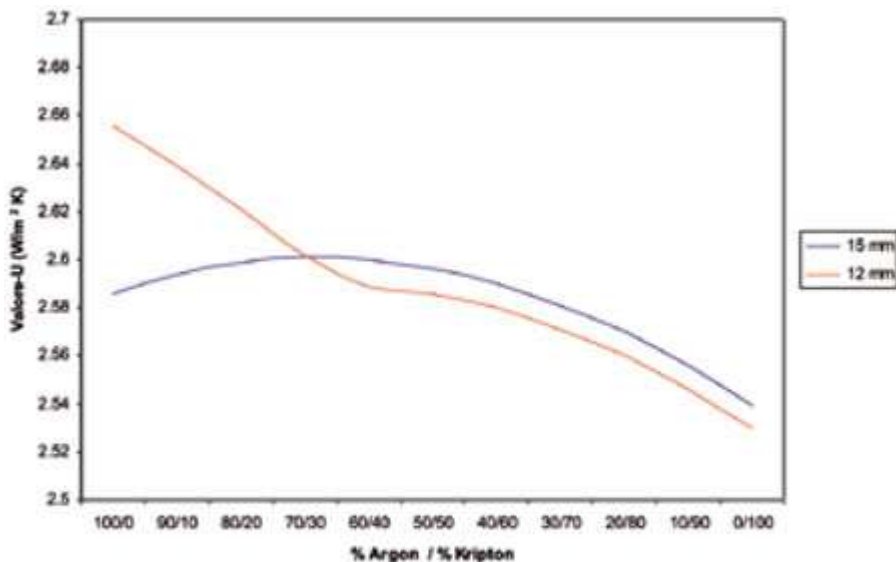


Figura 3 – Valore U di due vetrocamera al variare della miscela Argon/Kripton.

Nella figura 3, invece, si vede come varia, in un vetrocamera costituito da due vetri float di spessore 6 mm, il valore-U al variare della frazione percentuale argon/kripton per due diversi spessori dell'intercapedine: 12 e 15 mm, prossimi allo "spessore limite" rispettivamente per il kripton e per l'argon.

Mentre per l'intercapedine di 12 mm la sostituzione dell'argon con il più isolante kripton produce un progressivo miglioramento nell'isolamento termico, nel caso dell'intercapedine da 15 mm il generarsi di moti convettivi vanifica la minore conducibilità e addirittura peggiora l'isolamento termico. Inoltre, come già visto

in precedenza, mentre nel caso di riempimento con argon al 100% si ottiene un miglior isolamento termico con un'intercapedine di spessore maggiore, la presenza di moti convettivi anche con kripton al 100% fa sì che la trasmittanza termica sia minore per l'intercapedine da 12 mm che per quella da 15 mm.

La sostituzione di uno dei vetri float (emissività emisferica,  $s_s = 0.837$  come previsto dalla norma UNI EN673:2005) degli esempi considerati precedentemente (figure 1-3) con un vetro con rivestimento basso emissivo ad alte prestazioni ( $s_s = 0.037$ ), riducendo drasticamente la componente radiativa della trasmissione del calore, consente di ottenere vetrate isolanti con valori-U decisamente minori, ma non modifica né gli "spessori limite", né il confronto relativo fra le varie situazioni considerate.

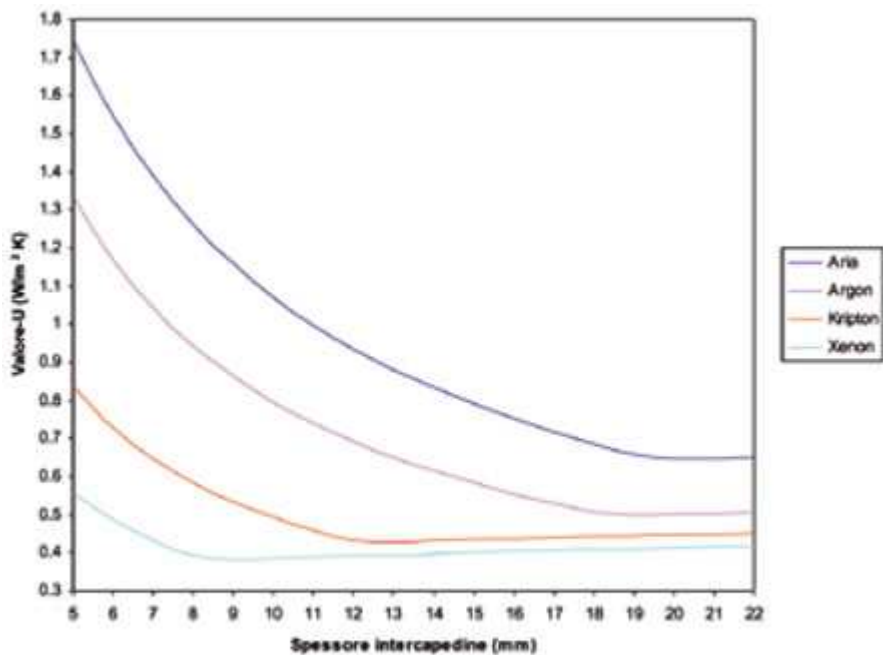


Figura 4 – Valore U di un vetrocamera 6/gas/6 BE in funzione dello spessore dell'intercapedine.

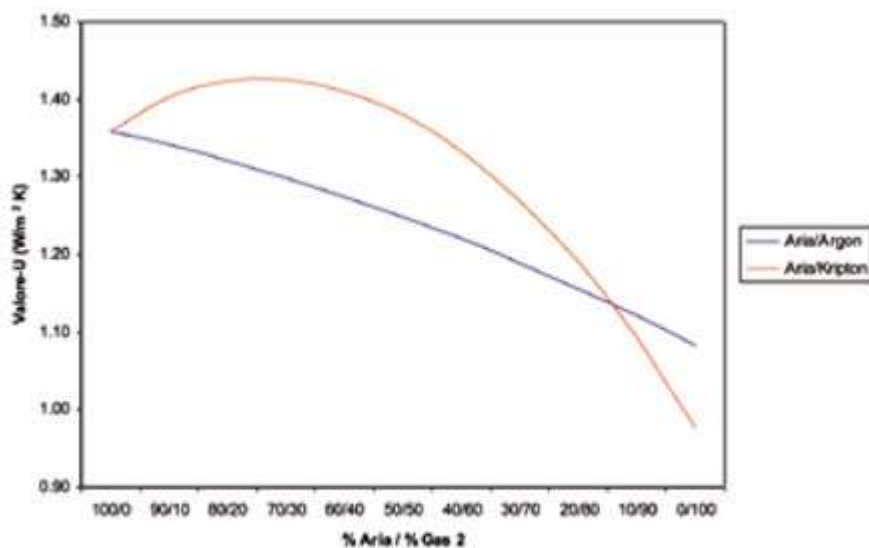


Figura 5 – Valore U di un vetrocamera 6/16/6 BE al variare della miscela di gas.

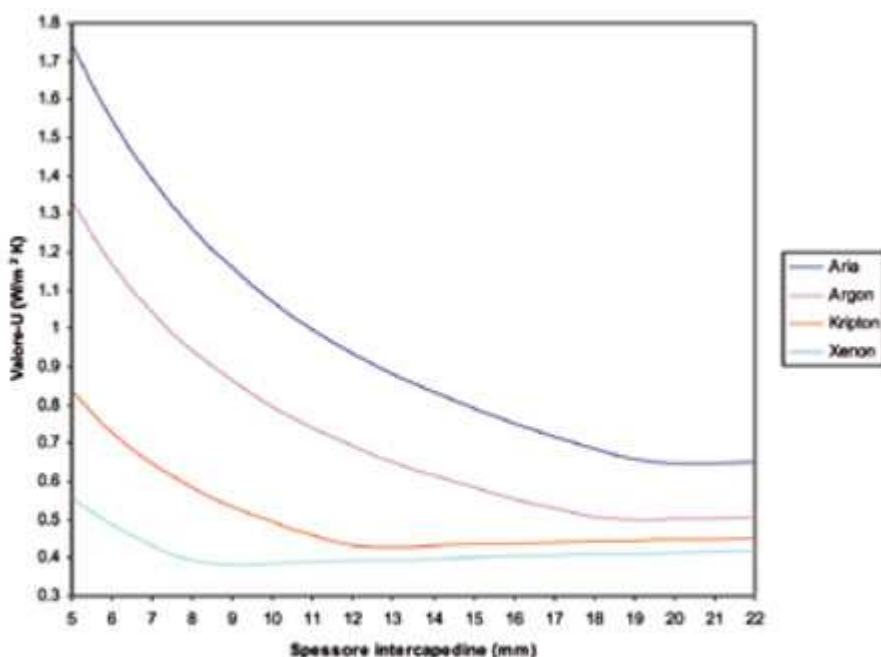
## 4. 2. Vetrocamera a più intercapedini

Si è detto come, la norma UNI EN673:2005 stabilisca di effettuare i calcoli considerando una differenza di temperatura di 15°C fra le facce adiacenti alle intercapedini delle lastre più esterna e più interna.

Nel caso di vetrocamera con più intercapedini, ciò significa che i AT fra le facce adiacenti una singola intercapedine, anche se possono non essere uguali fra loro, saranno minori di 15°C (la norma considera inizialmente un AT fra le facce adiacenti l'intercapedine pari a 15/N, dove N è il numero delle intercapedini del vetrocamera: i valori vengono quindi ricalcolati, con una procedura iterativa, fino a convergenza dei valori di conducibilità delle intercapedini).

La minore differenza di temperatura ostacola l'insorgere dei moti convettivi all'interno dei gas e quindi si avranno "spessori limite" maggiori di quelli ottenibili per il vetrocamera singolo.

Nell'esempio seguente si è considerato un vetrocamera composto da due vetri con rivestimento basso emissivo = 0.037) in faccia 2 e in faccia 4 ed un terzo vetro float non rivestito e (s due intercapedini di spessore e gas di riempimento uguale tra loro.



*Figura 6 – Valore U di un vetrocamera 6/gas/6/gas/6 in funzione dello spessore dell'intercapedine.*

Come si vede dalla figura 6, a parità di gas nell'intercapedine, gli "spessori limite" oltre i quali l'isolamento termico peggiora sono maggiori di quelli evidenziati in figura 1.

### Bibliografia

1. F. Kreith, **Principi di trasmissione del calore**, Liguori editore, 1975
2. C. Bonacina, A. Cavallini, L. Mattarolo, **Trasmissione del calore**, CLEUP editore, 1989
3. **UNI EN 673:2005**

### Autori

**Antonio Daneo, Alberto D'Este - Stazione Sperimentale del Vetro, Murano Venezia**