



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE**  
**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

**CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA MECCANICA**

**Tesi di Laurea:**  
**CARATTERIZZAZIONE DI VETRI TERMOCROMICI**  
**AL VARIARE DEL COATING DEPOSITATO**

*Characterization of thermochromic glasses to change the deposited coating*

*Relatore:*

Prof. Gian Marco Revel

*Correlatore:*

Ing. Giuseppe Pandarese

*Tesi di Laurea di:*

Michele Di Pumpo

Anno accademico 2019/2020



## *Indice:*

Introduzione.....	5
1. Il vetro.....	11
1.1 Proprietà e prestazioni dei vetri.....	11
1.2 Vetri termocromici caratterizzati da VO <sub>2</sub> .....	14
2. Sistema di misura.....	16
2.1 Sviluppo setup di misura in riflessione.....	16
2.2 Spettrofotometro Jasco V670.....	19
2.3 Sfera integratrice da 150mm modello ILN-725 per le prove di riflettanza.....	22
2.4 Sfera integratrice da 60mm termostata per prove di trasmittanza in temperatura.....	24
2.5 Pastiglie Spectralon.....	26
2.6 La cella di Peltier.....	27
2.7 TLK-33.....	28
3. Setup misurazioni.....	29
3.1 Setup riflessione.....	29
3.2 Setup trasmissione.....	32
4. Campioni analizzati.....	34
5. Prove sperimentali su campioni e analisi.....	37
5.1 Prove in riflessione.....	37
5.2 Prove in trasmissione.....	44
6. Conclusioni.....	50
Bibliografia.....	53





## *Introduzione:*

Giornalmente è trattato l'argomento "energia sostenibile" come uno dei temi più importanti. Tale concetto ha tre componenti chiave, una dal punto di vista della produzione di energia rinnovabile, una legata alla sua utilizzazione e quindi all'efficienza e al risparmio energetico ed infine l'ultima chiave legata all'impatto ambientale in termini di inquinamento; si tratta quindi di un approccio che non riguarda solo la produzione energetica, ma anche il suo utilizzo, inserendosi così in un'ottica complessiva di sviluppo sostenibile e di economia verde.

Sul fronte dell'impatto ambientale l'interesse per l'energia sostenibile nasce da esigenze ambientali quali:

-riduzione delle emissioni delle principali sostanze nocive prodotte dall'utilizzo dei combustibili fossili di origine organica come petrolio e derivati, gas, carbone etc... che hanno caratterizzato per gran parte del Novecento la principale fonte di energia e che ancora oggi hanno un notevole impatto.

-riduzione degli inquinanti dell'atmosfera e dell'idrosfera (a causa delle sostanze che vengono riversate illegalmente nelle falde acquifere, fiumi, laghi, mari).

Non sono le auto o in generale i mezzi di trasporto su gomma, i principali responsabili della presenza di Pm10 nell'aria delle città italiane ma sono gli impianti di riscaldamento. Caldaie, stufe e caminetti attivi solo da metà ottobre a metà aprile sono responsabili di più del 60% delle polveri sottili.

Dalle dichiarazioni dell'ultimo rapporto sulla qualità dell'ambiente urbano redatto da Ispra e riportato su "Il Sole 24 ORE" nell'articolo "*Pm10, sono le caldaie le principali responsabili dell'inquinamento*" del 21 dicembre 2018, tra i diversi argomenti trattati c'è anche quello delle emissioni inquinanti; nello specifico il rapporto prende in considerazione dati raccolti in 120 città italiane. Come si evince dalla Figura 1, è messo a confronto il dato più recente relativo al 2015 con quello registrato nel 2005.

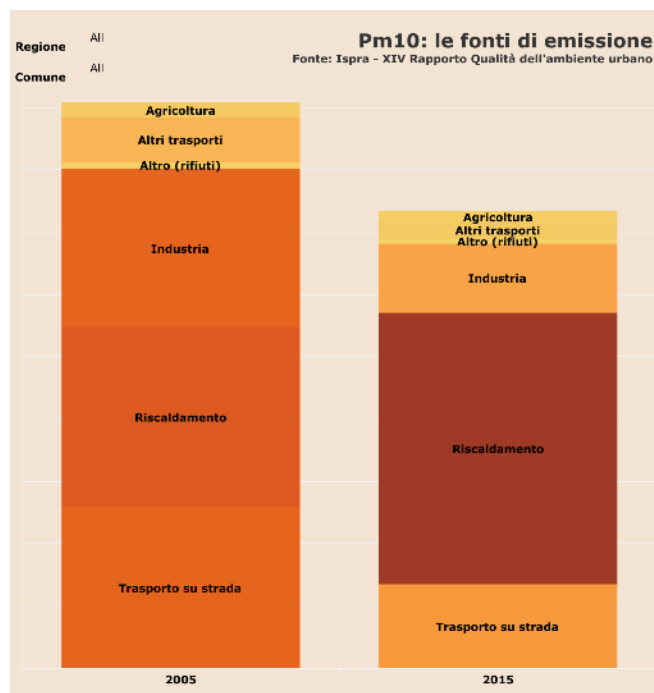


Figura 1: confronto fonti emissione Pm10

Dall'analisi emerge che in un decennio si è scesi da 45mila a 36mila tonnellate emesse, con un calo del 19%.

A livello generale la qualità dell'aria nelle città italiane è migliorata ma bisogna anche focalizzarsi in un punto preciso, nel 2005 le caldaie erano responsabili dell'emissioni di 14mila tonnellate di Pm10, nel 2015 si è arrivati a superare quota 21mila; un incremento di oltre il 50%.

Il peso degli impianti di riscaldamento oltre che in termini assoluti, cresce anche percentualmente sul totale delle emissioni, poiché l'industria è scesa da 12,7 a 5,5 migliaia di tonnellate di particolato; mentre il trasporto è passato da poco meno di 13mila a poco meno di 7 mila, dimezzando sostanzialmente le proprie emissioni. Questo risultato si è ottenuto attraverso la sostituzione del parco auto, con veicoli più nuovi che hanno quindi emissioni minori e con il blocco dei veicoli più inquinanti.

In seguito ad un'analisi approfondita si può affermare che i progressi per ridurre il particolato dovuto alle auto sono notevoli ma la sfida ancora più urgente, visti i dati, è quella di ridurre l'impatto degli impianti di riscaldamento, poiché è il riscaldamento domestico, soprattutto a biomasse una delle principali fonti di inquinamento.

Da uno studio comparativo sulle emissioni degli apparecchi a gas, gpl, gasolio e pellet condotto da Innovhub Stazioni sperimentali per l'industria e riportato sul sito "ARPAT" il 21 febbraio 2018, è emerso come i piccoli apparecchi alimentati a biomassa solida, cioè a legna, impattino pesantemente sul valore delle emissioni inquinanti nel settore domestico. Il pellet ha dimostrato di essere inquinante non ai livelli della legna, ma i livelli di emissioni di ossido di azoto e composti organici volatili sono abbastanza alti. Lo studio ha evidenziato l'impatto negativo sulla qualità dell'aria determinato dall'incentivazione dell'utilizzo delle biomasse e si è incentrato sulla misurazione sperimentale delle emissioni prodotte da caldaie murali alimentate a gas naturale ed a GPL, sull'individuazione dei fattori di riferimento per tutti i combustibili da riscaldamento utilizzati in Italia ed infine sul confronto delle emissioni delle stufe a pellet in relazione alla qualità degli apparecchi e alla qualità del combustibile utilizzato. Nella prova sono state utilizzate due stufe a pellet, una di gamma medio-alta e l'altra più economica, ciascuna è stata testata sia con pellet di classe A1 (qualità più elevata disponibile) sia con pellet di classe A2 (pellet di minor qualità).

Dallo studio sono emersi i dati raccolti in Tabella 1:

**Tabella 1. Fattori di emissione misurati nello studio Innovhub-SSI**

Combustibile	CO g/GJ	NOx g/GJ	SOx g/GJ	COV g/GJ	PM g/GJ	IPA benzo(a)Pirene µg/MJ	NOTE
Gas Naturale	56.6	32.3	0.3 <sup>a</sup>	<0.15	<0.04	<0.08	<sup>a</sup> valore medio di letteratura
GPL	47.8	22.6	2.2 <sup>b</sup>	<0.15	<0.04	<0.08	<sup>b</sup> elaborazione ISSI sulla base di dati di specifica
Gasolio	3.7 <sup>c</sup>	34 <sup>c</sup>	19.3 <sup>c</sup>	1.1 <sup>c</sup>	0.1 <sup>c</sup>	0.08 <sup>a</sup>	<sup>c</sup> dati ISSI su caldaie di potenza >150 kW <sup>a</sup> valore di letteratura
Legna	5862 <sup>d</sup>	122 <sup>d</sup>	10.7 <sup>d</sup>	536 <sup>d</sup>	254 <sup>d</sup>	68.7 <sup>d</sup>	<sup>d</sup> dati ISSI
Pellet A1 stufa 4 stelle	175.6	135.9	6.87 <sup>e</sup>	6.7	23.9	0.22	<sup>e</sup> valore teorico sulla base del contenuto di zolfo
Pellet A1 stufa 3 stelle	141.4	118.2	6.87 <sup>e</sup>	40.5	44.1	0.18	<sup>e</sup> valore teorico sulla base del contenuto di zolfo
Pellet A2 stufa 4 stelle	236.1	166.3	12.8 <sup>e</sup>	8.2	83.8	0.1	<sup>e</sup> valore teorico sulla base del contenuto di zolfo
Pellet A2 stufa 3 stelle	625.7	233.2	12.8 <sup>e</sup>	223.8	82.9	0.94	<sup>e</sup> valore teorico sulla base del contenuto di zolfo

Analogamente quanto detto per gli apparecchi alimentati a biomassa solida, è riferito anche ai condizionatori ed ai sistemi di raffreddamento utilizzati in estate, poiché durante questo periodo anche se non vengono utilizzati gli impianti di riscaldamento e quindi vengono dimezzati drasticamente i livelli di inquinamento, vengono utilizzati sistemi di condizionamento dell'aria che provocano altrettante emissioni nocive.

Attraverso nuove tecnologie sostenibili in grado di garantire lo stesso comfort delle nostre odierne abitazioni, si cerca di ridurre drasticamente le emissioni. Studi scientifici si stanno focalizzando sulla produzione di vetri sostenibili poiché da anni ormai il vetro è l'elemento strategico nella costruzione di maestosi edifici; quest'ultimo riesce a fornire un contatto visivo fra interno ed esterno garantendo l'illuminazione naturale diurna ed una gradevole visione per l'osservatore.



Figura 2: UniCredit Milano

Con i suoi 231 metri d'altezza, la Torre UniCredit visibile in Figura 2 è il grattacielo più alto d'Italia; esso è costituito da una facciata completamente in vetro che garantisce un notevole impatto visivo.



Figura 3: Blocco sud UNIVPM

In Figura 3 è riportata la facciata del blocco sud dell'Università Politecnica delle Marche che è completamente in vetro e dona luce all'interno dell'edificio.

Il vetro però, permettendo l'ingresso di un'enorme quantità di calore nelle stagioni estive e la fuoriuscita di calore nelle stagioni invernali risulta essere un problema poiché queste condizioni devono essere equilibrate da impianti di raffreddamento o riscaldamento citate in precedenza che provocano altre emissioni dannose.

Per ovviare questi problemi si stanno sviluppando vetri con caratteristiche dinamiche in grado di adattarsi sia al clima estivo che a quello invernale; uno studio molto approfondito è quello a cui ha preso parte l'Università Politecnica delle Marche che sta sviluppando vetri termocromici in grado di cambiare le loro caratteristiche di riflessione e trasmissione in base alla temperatura del vetro ed in base al coating depositato su di essi.

I vetri termocromici sono caratterizzati da ossido di vanadio ( $\text{VO}_2$ ) o da ossido di vanadio ed aggiunta di silice ( $\text{VO}_2 - \text{SiO}_2$ ), che sono i componenti chimici in grado di variare la risposta dinamica del vetro; essi inoltre sono caratterizzati da una temperatura di attivazione, alla quale oltre ad un aumento notevole della conducibilità elettrica si ha un aumento della radiazione infrarossa riflessa; inoltre la temperatura di attivazione può

essere regolata aggiungendo o togliendo tungsteno. Per questi motivi l'ossido di vanadio rappresenta l'elemento fondamentale per lo sviluppo di vetri termocromici.

Lo scopo del progetto è quello di sviluppare vetrate intelligenti e commercializzare questi vetri per la costruzione di grandi edifici in modo da ridurre drasticamente le emissioni e quindi contribuire all'annullamento dell'inquinamento.

In questa tesi si partirà con la descrizione del nuovo setup di misura in grado di ottenere misurazioni più precise ed affidabili; successivamente verranno effettuate le varie misurazioni in riflessione ed in trasmissione dei vari campioni da analizzare nella banda di lunghezze d'onda elettromagnetica variabili tra i 300nm e 2500nm al variare della temperatura del campione in un range di temperatura tra i 20°C e 90°C. Infine verranno rielaborati i dati ricavati con lo scopo di ottenere vetri che possano garantire un'ottima risposta dinamica.

# 1. Il vetro

## 1.1 Proprietà e prestazioni dei vetri

Il vetro è sempre più utilizzato per la realizzazione di facciate di grandi edifici; esso oltre a trasmettere la luce naturale e quindi ridurre enormemente la richiesta d'illuminazione interna che richiede consumi energetici, permette anche la trasmissione di calore solare cioè per radiazione solare e quello non solare che può essere attribuito direttamente allo scambio termico tra l'interno e l'esterno che avviene per irraggiamento, conduzione e convezione.

In figura 4 è schematizzato lo scambio di calore che si ha attraverso una finestra:

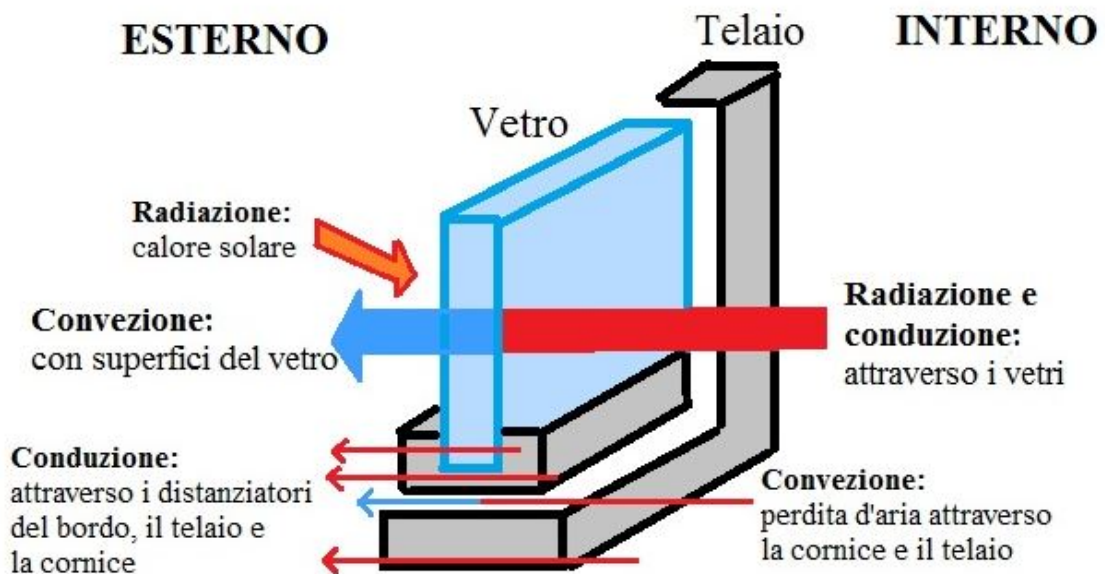


Figura 4: Schema di conduzione del calore attraverso la vetrata

In questo operato sono stati utilizzati vetri termocromici che si caratterizzano per la loro ottima azione sulla radiazione solare; è quindi importante focalizzare l'interazione della radiazione solare con il vetro.



Solitamente quando un vetro viene colpito da una radiazione solare, essa può essere trasmessa, riflessa o assorbita. Nella figura successiva è schematizzata l'interazione della radiazione con il vetro.

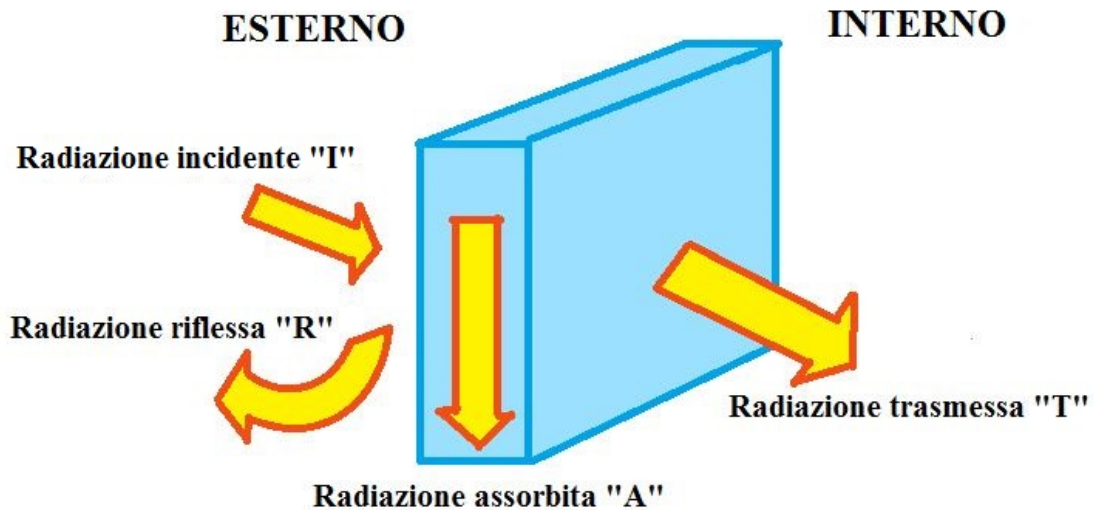


Figura 5: comportamento energetico del vetro

Nella figura 5 è indicata la radiazione incidente “I”, la radiazione riflessa “R”, la radiazione assorbita “A” e la radiazione trasmessa “T”; tra esse vale la relazione:

$$R + A + T = I \text{ [W/m}^2\text{]}$$

Per valutare le prestazioni energetiche di un vetro, il fattore solare è uno dei parametri più importanti.

E' possibile definire dei parametri che, per ogni lunghezza d'onda ci informino sulla quantità di radiazione trasmessa, riflessa o assorbita dal vetro, rispetto la radiazione incidente totale.

- Trasmittanza ottica:  $T = I_T / I_0$
- Riflettanza ottica:  $R = I_R / I_0$
- Assorbimento ottico:  $A = I_A / I_0$



Con:

$I_0$  = flusso radiante incidente

$I_T$  = flusso radiante trasmesso

$I_R$  = flusso radiante riflesso

$I_A$  = flusso radiante assorbito

Avendo numeratore e denominatore la stessa unità di misura [ $W/m^2$ ], i parametri citati precedentemente sono adimensionali; essi sono moltiplicati per 100 in modo tale da avere i valori percentuali che sono indicati con T% ,R% e A%.

La relazione precedente, per comodità può essere scritta:

$$R\% + A\% + T\% = 100\%$$

L'obiettivo del lavoro è progettare un sistema in grado di far variare la temperatura ad un campione di vetro termocromico e caratterizzare lo spettro riflesso e quello trasmesso in funzione di essa.

I parametri descritti variano non solo in funzione della temperatura, ma anche in funzione della lunghezza d'onda della radiazione luminosa considerata.

E' possibile dedurre che  $R\% = R\%(T, \lambda)$  e  $T\% = T\%(T, \lambda)$

Per comodità in tabella 2 sono riepilogate le grandezze che si incontreranno durante le varie prove, i relativi simboli e le unità di misura.

<b>GRANDEZZA</b>	<b>SIMBOLO</b>	<b>UNITÀ DI MISURA</b>
Percentuale radiazione riflessa	R%	/
Percentuale radiazione trasmessa	T%	/
Percentuale radiazione assorbita	A%	/
Temperatura	T	°C
Lunghezza d'onda	$\lambda$	nm
Tempo	t	s

Tabella 2

## 1.2 Vetri termocromici caratterizzati da VO<sub>2</sub>

I vetri termocromici rientrano nel gruppo dei materiali cromogenici che hanno la capacità di mutare le proprie caratteristiche ottiche in risposta a stimolazioni esterne.

Una sostanza cromogenica varia il suo comportamento ottico grazie a particolari peculiarità chimico-fisiche, in risposta ad uno stimolo elettrico, al variare di una particolare radiazione elettromagnetica (infrarosso, visibile, ultravioletto) in risposta all'aumento di temperatura del materiale.

Si dividono in tre gruppi:

- Elettrocromici: materiali in grado di cambiare colore in risposta a stimoli esterni. Se lo stimolo è di natura elettrica il materiale si definisce elettrocromico.
- Fotocromici: materiali in grado di modificare il proprio colore e la propria trasparenza a seconda della radiazione elettromagnetica che ricevono.
- Termocromici: si definisce termocromica una sostanza trasparente soggetta alla modificazione reversibile delle sue proprietà ottiche in funzione della temperatura, attraverso una reazione chimica. Ripristinate le condizioni termiche iniziali, la sostanza torna allo stato originario.

I vetri termocromici analizzati sono caratterizzati da ossido di vanadio (VO<sub>2</sub>) che è l'elemento responsabile della mutazione delle proprietà ottiche del vetro. La sua temperatura di transizione dallo stato opaco a quello trasparente all'infrarosso è relativamente vicina a quella ambiente ( $T_t = 68^\circ\text{C}$ ), ed è regolabile con l'aggiunta di Tungsteno (W).

Il cambiamento è dovuto al superamento della temperatura di transizione, da una struttura monoclinica con proprietà di semiconduzione ed alta trasmittanza infrarossa, ad una struttura tetragonale con conduttività metallica ed aumentata riflettanza nell'infrarosso.

La figura 6 evidenzia il passaggio del VO<sub>2</sub> da struttura monoclinica a tetragonale.

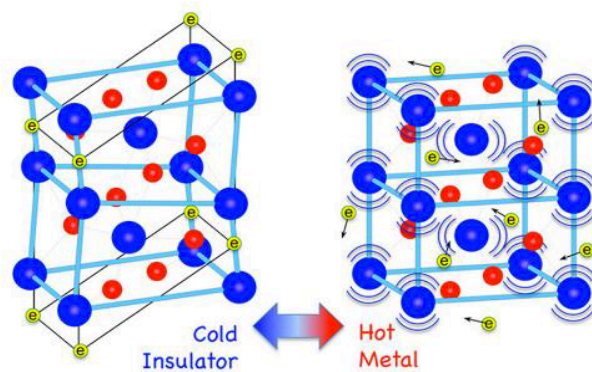


Figura 6: passaggio dell'ossido di vanadio dalla struttura monoclinica alla struttura tetragonale

Oltre alle caratteristiche elettrochimiche il cambiamento di fase produce anche il passaggio per l'ossido di vanadio dall'essere trasparente agli infrarossi all'essere riflettente per quelle determinate lunghezze d'onda.

In figura 7 si può notare come vari la riflettanza spettrale tra i 20°C e i 90°C.

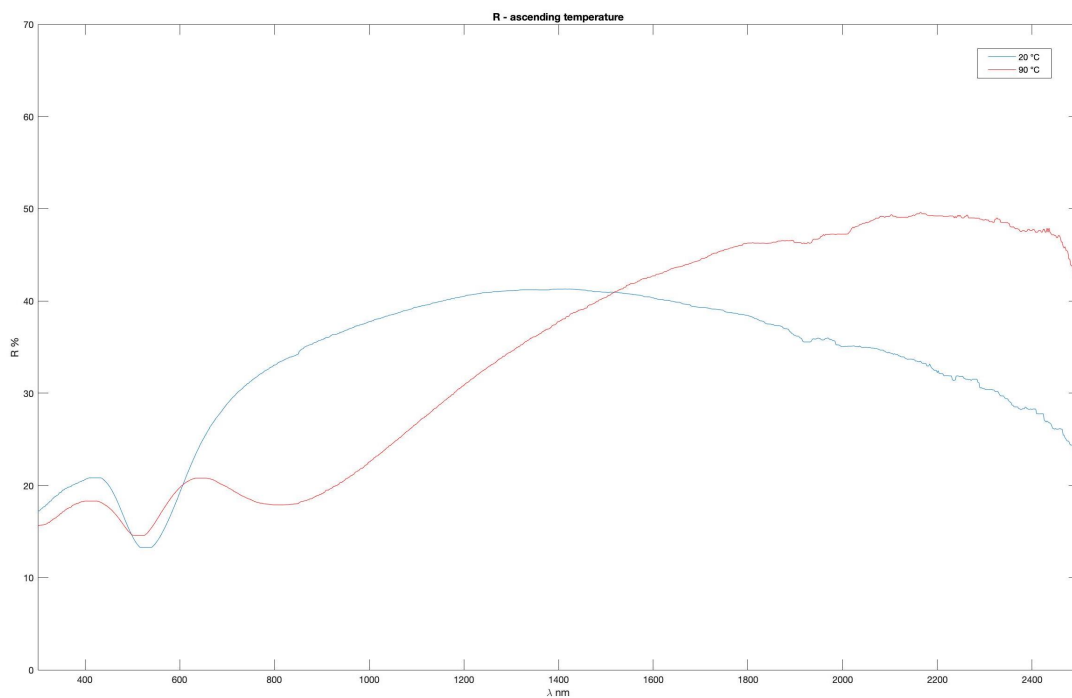


Figura 7: differenza curva stato freddo – curva stato caldo.

## 2. Sistema di misura

### 2.1 Sviluppo setup di misura in riflessione

Per effettuare le varie misurazioni in riflessione, come possiamo notare in figura 8, era a disposizione un setup composto da Spettrofotometro Jasco V670, sfera integratrice, pompa acqua e bagno termostato; anche se ben funzionante il lavoro iniziale è stato quello di migliorare il setup per le misure in riflessione e successivamente modificarlo per effettuare le prove dei medesimi campioni anche in trasmissione.

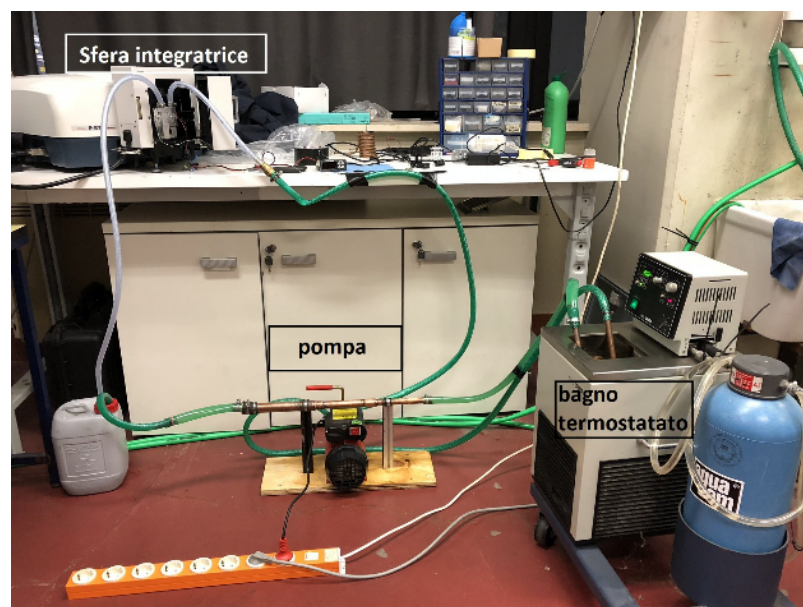


Figura 8: setup iniziale

Uno degli obiettivi iniziali è stato quello di migliorare il sistema di variazione della temperatura del campione ridimensionando sia pompe che tubi con lo scopo di garantire misurazioni esenti da errori e un impianto di ricircolo acqua adeguato alle nostre esigenze così da ottenere un sistema meno ingombrante e più semplice da utilizzare.

Per ridimensionare il sistema di ricircolo acqua sono stati utilizzati componenti facilmente reperibili in commercio ed altri creati o adattati in base alle nostre esigenze. Dapprima è stato creato un telaio per sorreggere i tubi che sono collegati direttamente alla pompa.

Per la ricerca della pompa da acquistare sono stati effettuati studi riguardo la lunghezza del circuito d'acqua utilizzato, la prevalenza e la portata d'acqua di cui avevamo bisogno; è stato così deciso di acquistare una pompa ad immersione dalle dimensioni molto ridotte così da ottenere un banco di lavoro molto più pulito ed organizzato, inoltre la pompa è in grado di funzionare senza emettere rumore fastidioso.

La pompa in figura 9 è la Atman AT-104 che ha portata  $Q_{MAX}= 2000$  l/h e prevalenza  $H_{MAX}= 2$  m.



Figura 9: pompa ad immersione Atman AT-104

La pompa è stata immersa in acqua demineralizzata contenuta in un serbatoio di vetro nel quale è stato immerso anche un sensore per verificare la temperatura dell'acqua.

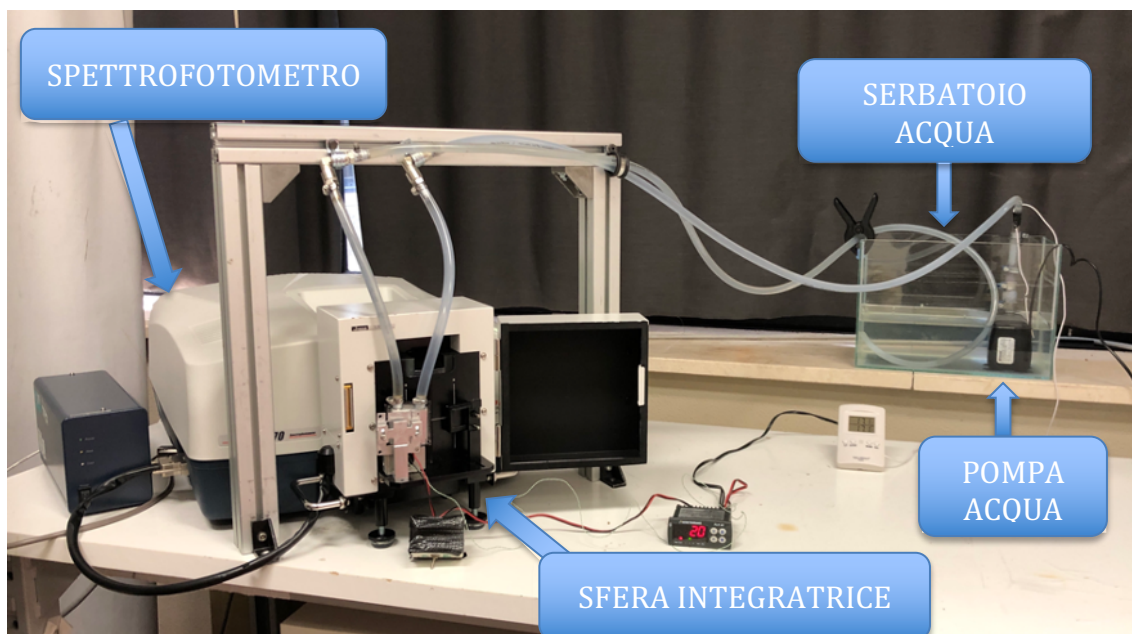


Figura 10: setup finale per prove in riflessione

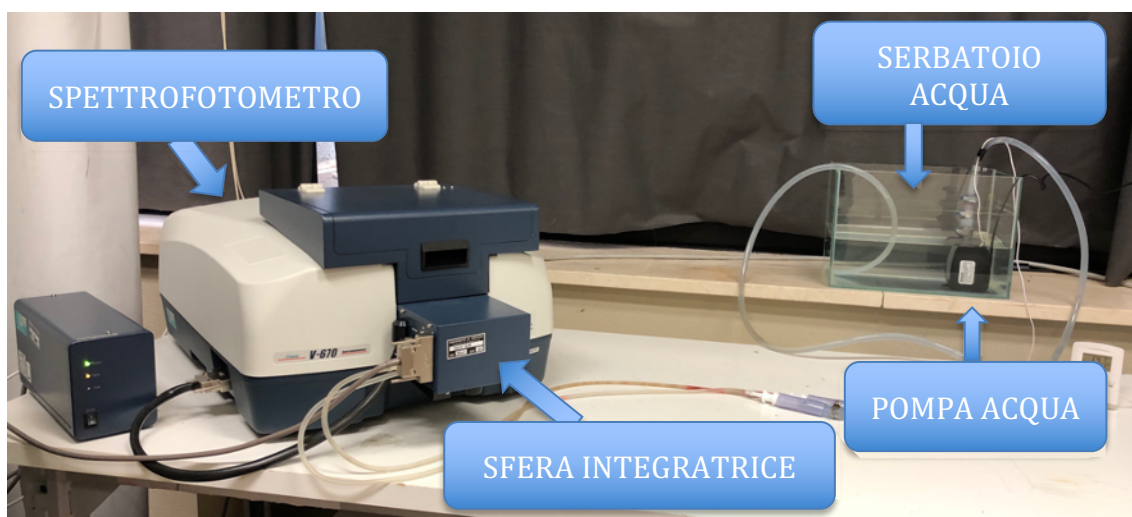


Figura 11: setup finale per prove in trasmissione.

Per effettuare le varie misurazioni sono stati adoperati i seguenti dispositivi:

- Spettrofotometro Jasco V670
- Sfere integratrici
- Cella di Peltier
- TLK-33
- Pastiglie Spectralon
- Pompa acqua

## 2.2 Spettrofotometro Jasco V670

Lo spettrofotometro JASCO V670 (in figura 12) consente di misurare gli spettri di riflessione, trasmissione e assorbanza (riflettanza trasmittanza ed assorbanza spettrale) di solidi o fluidi. È importante ricordare che l'assorbanza non coincide con l'assorbimento: essa è pari al logaritmo in base 10 del rapporto fra radiazione incidente e radiazione trasmessa: una misura di assorbanza dà la stessa informazione di una di trasmittanza.

Il principio di misura dello spettrofotometro consiste nella generazione di luce monocromatica (generata dal componente chiamato "monocromatore") che viene divisa in 2 fasci inviati rispettivamente al campione e al riferimento (il sistema viene per questo definito "Spettrofotometro a doppio raggio").

La riflettanza/trasmittanza/assorbanza vengono quindi calcolate dal rapporto tra l'intensità del fascio di misura rispetto a quello di riferimento. Lo strumento è in grado di coprire un ampio range spettrale dall'UV al vicino Infrarosso (NIR): 190-2700nm.



Figura 12: spettrofotometro Jasco V-670



Nel seguito vengono illustrati in figura 13 la struttura del sistema e il meccanismo che permette la formazione di un raggio monocromatico all'interno dello spettrofotometro.

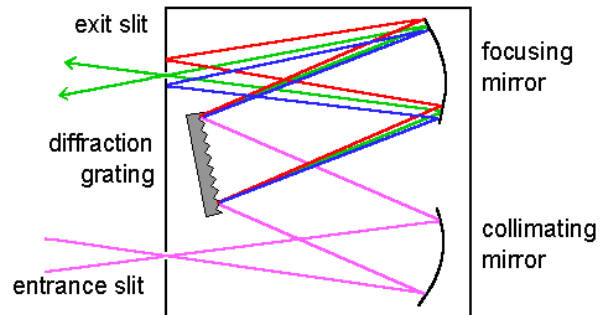


Figura 13: struttura spettrofotometro e formazione raggio monocromatico

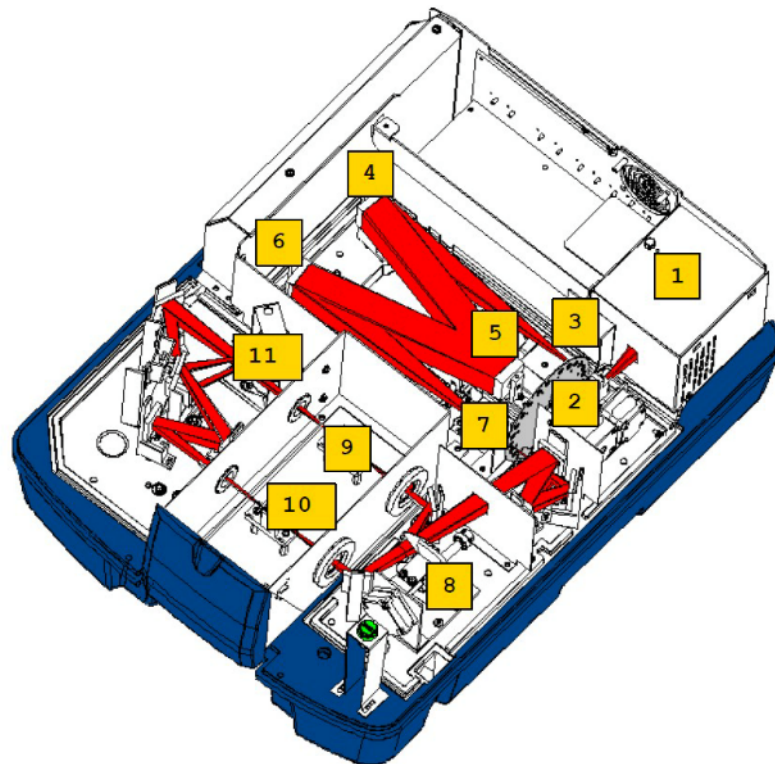


Figura 14: componenti dello spettrofotometro

Lo spettrofotometro, nella sua configurazione standard, consente la misura degli spettri di trasmissione e assorbimento ed è costituito dagli elementi illustrati in figura 14:

1. Sorgente di luce: sono presenti una lampada al deuterio (UV) e una lampada alogena (visibile e NIR)
2. Filtro passa banda (elimina gli ordini superiori del monocromatore)
3. Fenditura di ingresso



4. Specchio collimatore
5. Reticolo di diffrazione: separa la luce policromatica incidente in fasci monocromatici che vengono deviati ad angoli differenti
6. Specchio che focalizza il fascio verso la fenditura di uscita
7. Fenditura di uscita
8. Disco selettivo che suddivide il fascio in un fascio di riferimento e uno di misura
9. Fascio di riferimento
10. Fascio di misura
11. Compartimento sensori: un tubo fotomoltiplicatore e 1 sensore PbS

## 2.3 Sfera integratrice da 150mm modello ILN-725 per le prove di riflettanza

Lo spettrofotometro descritto nella sezione precedente consente di eseguire misure di trasmittanza/assorbanza spettrale. Esso può essere equipaggiato con la sfera integratrice, modello ILN-725 per poter eseguire misure di riflettanza sia diffusa che totale.

Il suo range di misura va dai 220 ai 2200 nm.

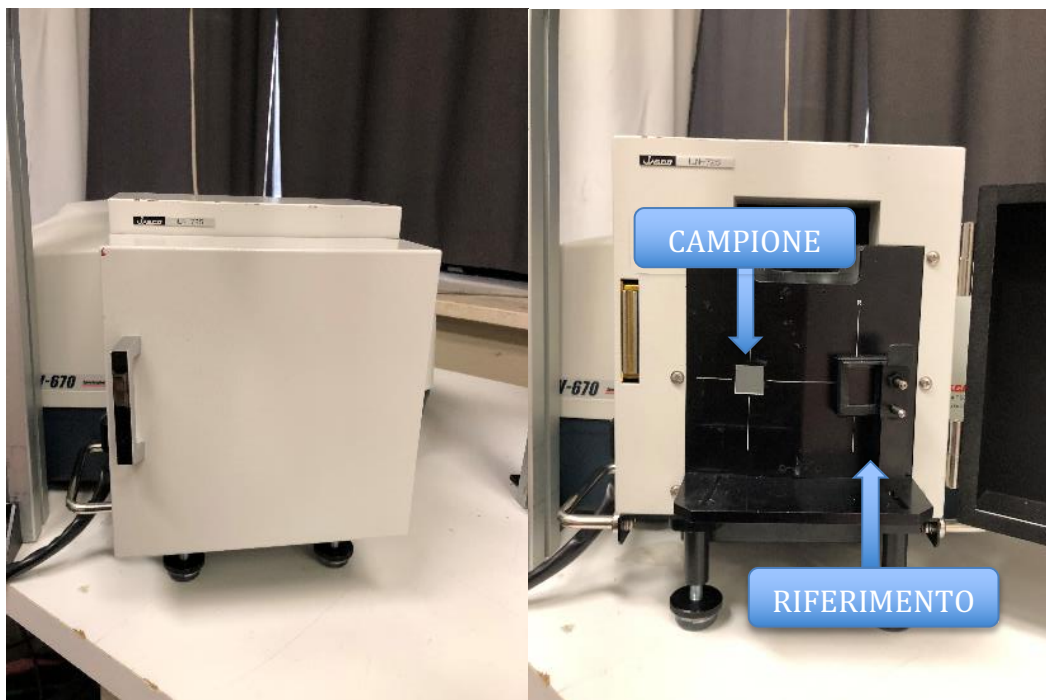


Figura 15: sfera integratrice ILN-725

La sfera integratrice è una sfera di diametro 150mm rivestita di un materiale (Spectralon, BaSo<sub>4</sub>) che ha 2 proprietà fondamentali:

- riflette la quasi totalità della radiazione incidente
- è una superficie Lambertiana, ovvero riflette con uguale intensità in tutte le direzioni.

I raggi di misura e riferimento vengono deviati all'interno della sfera dove vengono riflessi rispettivamente dal campione e dal riferimento, che consiste in una pastiglia a sua volta realizzata in spectralon.

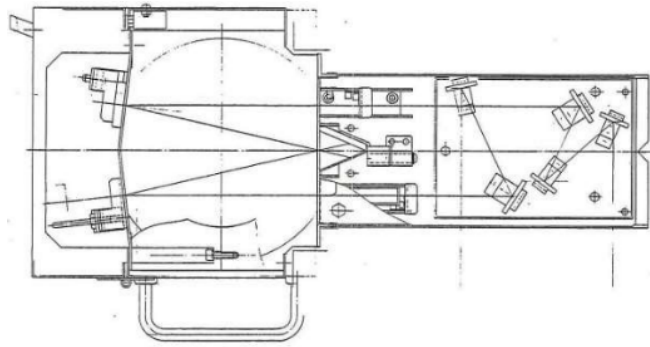


Figura 16: vista in sezione dall'alto della sfera integratrice.

La sfera integratrice ha il compito di raccogliere la radiazione diffusa in tutte le direzioni e di inviarla ai due sensori fotonici (1 tubo fotomoltiplicatore e 1 sensore PbS) che sono presenti all'interno della sfera stessa. Riportiamo schema di funzionamento in figura 17.

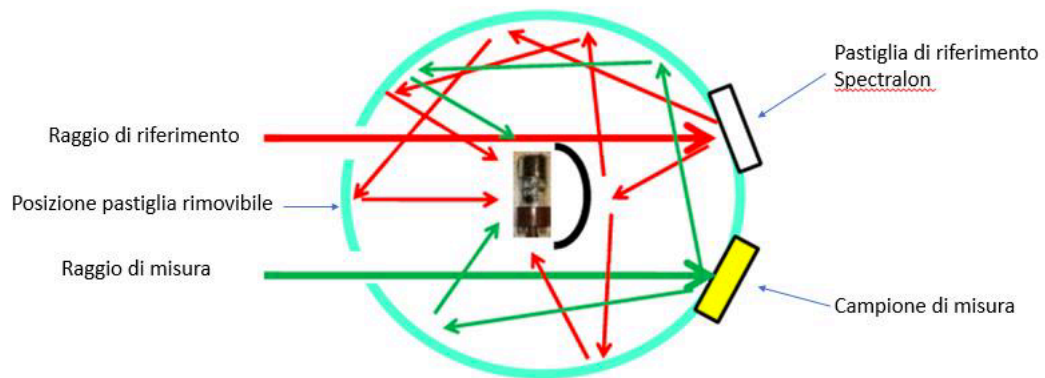


Figura 17: schema funzionamento sfera integratrice

## 2.4 Sfera integratrice da 60mm termostata per prove di trasmittanza in temperatura

L'impresa Jasco ha realizzato dietro nostra richiesta una sfera integratrice, di diametro 60 mm, per la realizzazione di prove di trasmissione in temperatura. Accoppiando la sfera allo spettrofotometro V670 nel modo indicato in figura, e garantendo il funzionamento del sistema di raffreddamento ad acqua del dispositivo, ci è stato possibile realizzare in maniera sicura ed affidabile le prove stabilite.

Essenzialmente questo dispositivo controlla la temperatura del campione riscaldando il porta campioni che lo alloggia con una cella di Peltier raffreddata ad acqua. Nella sezione relativa alle prove di riflettanza in temperatura si descriverà più nel dettaglio il funzionamento delle celle di Peltier.



Figura 18: Spettrofotometro Jasco V 670, sfera integratrice da 60 mm termostata per prove di trasmittanza, circuito di raffreddamento ad acqua e alimentatore riscaldamento



Figura 19: vista dall'alto della sfera integratrice ed alloggiamento campione

Come illustrato in figura 19, il campione di misura viene posizionato fra la sfera integratrice e l'alloggiamento della cella di Peltier, in modo che esso possa essere allo stesso tempo riscaldato o raffreddato e soggetto al test di trasmittanza.

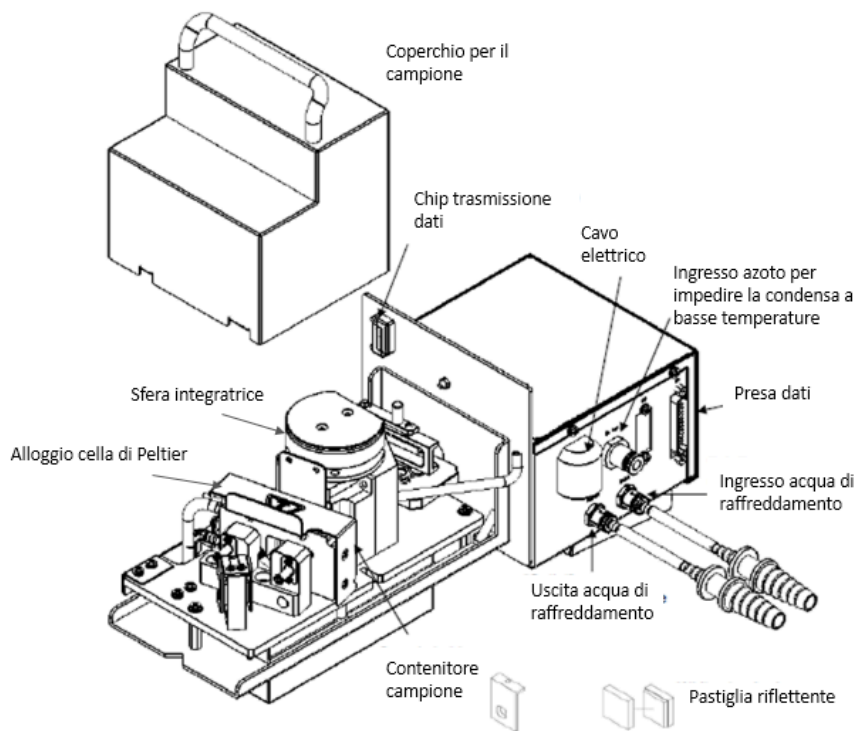


Figura 20: struttura sfera termostata da 60mm

## 2.5 Pastiglie Spectralon



Figura 21: pastiglia Spectralon

Pastiglie realizzate in Spectralon ed utilizzate per le misurazioni sia in riflessione che in trasmissione. Le pastiglie dato il loro colore bianco, sono state utilizzate soprattutto come riferimento dato che i raggi di misura e riferimento vengono deviati all'interno della sfera dove vengono riflessi rispettivamente dal campione e dal riferimento.

## 2.6 La cella di Peltier

Le celle di Peltier sono dei dispositivi termoelettrici che sfruttano appunto l'effetto Peltier, ovvero il fenomeno per cui una corrente elettrica che scorre tra due metalli o semiconduttori differenti posti in contatto produce un trasferimento di calore; esso è l'opposto dell'effetto Seebeck. A seconda del verso con cui la corrente viene fatta fluire nella cella si avrà una cessione o un assorbimento di calore, permettendo di decidere quale delle due facce della cella sia calda e quale fredda. Il loro uso in dispositivi compatti e precisi per il controllo della temperatura si è andato estendendo sempre più nel corso degli anni (Mannella, 2013). Nelle figure che seguono (figura 22 e 23) vengono riportate le caratteristiche tecniche e dimensionali della cella di Peltier utilizzata in questa esperienza.



Figura 22: cella di Peltier

Temperatura lato caldo (°C)	27°C
Qmax (Watt)	27
Delta Tmax (°C)	68
I <sub>max</sub> (Amper)	3,2
V <sub>max</sub> (Volt)	15,4
Resistenza (Ohm)	3,5

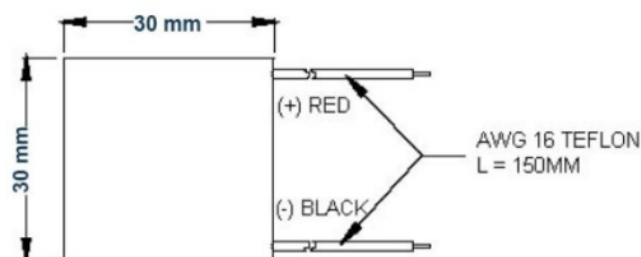


Figura 23: scheda tecnica della cella di Peltier

## 2.7 TLK-33

Una volta trovato il modo per scaldare e raffreddare il campione era necessario regolare in modo adeguato la sua temperatura. Per questo scopo si è fatto ricorso al TLK-33, un regolatore digitale a microprocessore dedicato al controllo delle celle di Peltier.

Il TLK-33 regola la tensione (e quindi la temperatura) da imporre alla Peltier attraverso l'input fornitogli da una termocoppia collegata al campione da misurare.



Figura 24: TLK-33 regolato a 20°C (temperatura iniziale per le prove) si notino i cavi di collegamento alla Peltier (rosso e nero), la termocoppia (bianco e verde) e l'alimentazione a corrente elettrica.



### 3 Setup misurazioni

#### 3.1 Setup Riflessione

Le prove realizzate in riflessione sono state eseguite con la sfera integratrice da 150mm modello ILN-725 sui vari campioni che ci sono stati forniti.

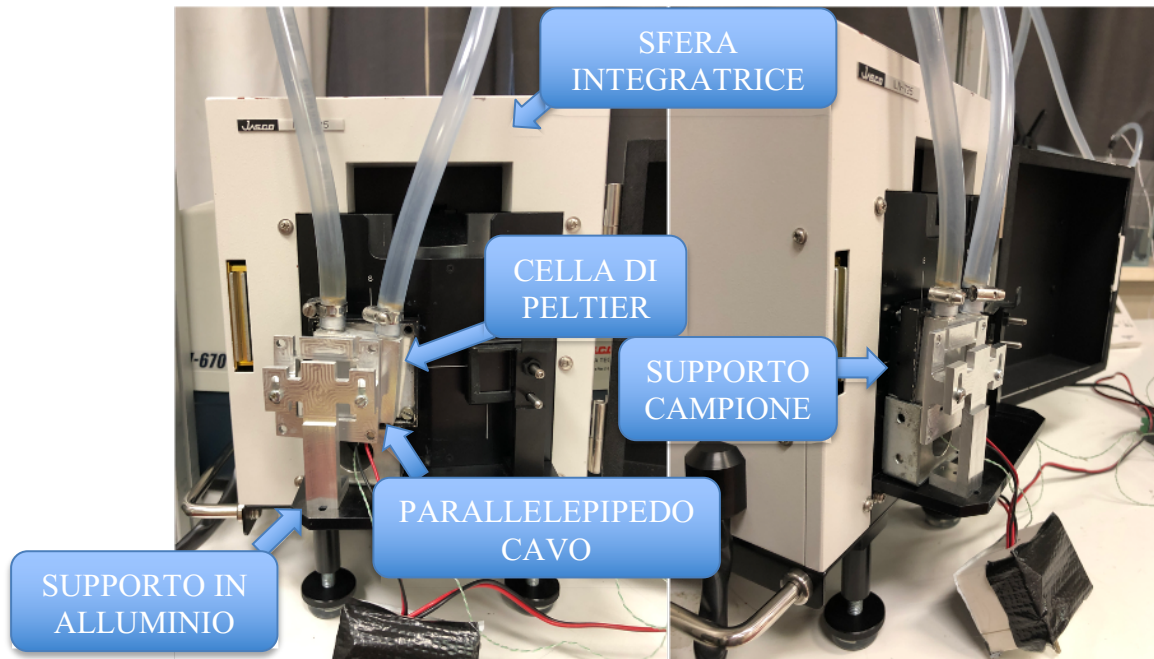


Figura 25: configurazione finale di misura

Le componenti descritte precedentemente fanno parte del setup finale di misura visibile in figura 25, esse sono collegate in modo opportuno ad un supporto realizzato in alluminio il quale teneva ben saldo tutto l'impianto da noi realizzato alla sfera integratrice. Nel complesso, partendo dal supporto in alluminio, possiamo notare il parallelepipedo cavo con i due attacchi ai quali sono collegati i tubi che servono per far scorrere l'acqua al suo interno; la faccia del parallelepipedo si può subito intuire che combacia con la Peltier, la quale a sua volta tramite della pasta termoconduttiva è collegata al supporto contenente il vetrino da campionare.

Dalla figura 25 si può ben notare la configurazione finale ed i vari accessori utilizzati per una corretta misurazione in modo da evitare sollecitazioni o movimenti che avrebbero potuto compromettere l'affidabilità della misurazione.

Seguono figure dei vari accessori utilizzati:

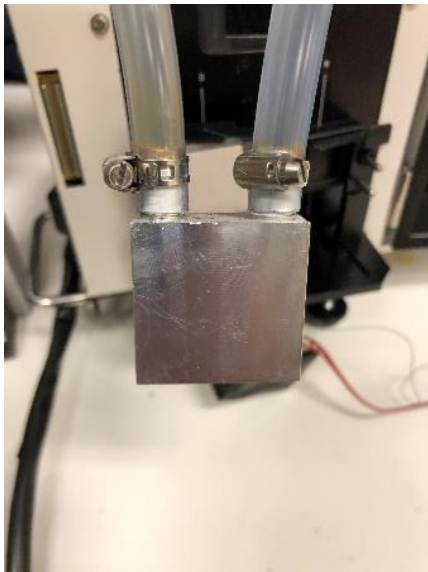


Figura 26: parallelepipedo cavo

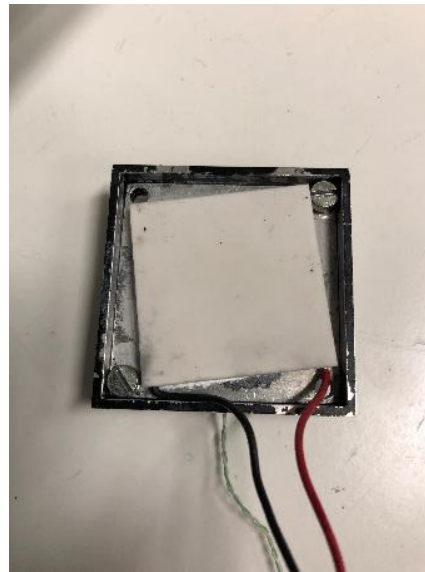


Figura 27: cella di Peltier vincolata al supporto campione

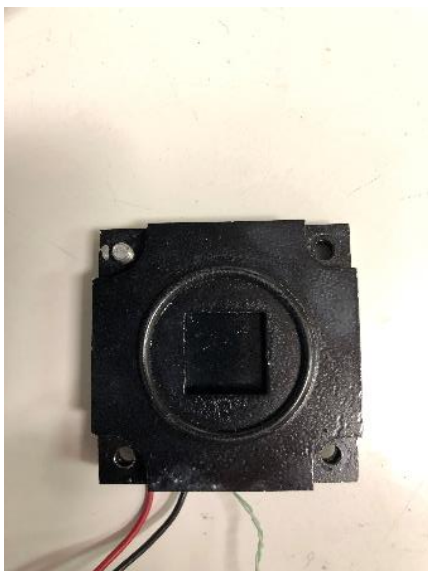


Figura 28: supporto campione



Figura 29: supporto aperto per inserimento campione

Configurato il setup ottimale ed ottimizzato il sistema di rilevamento abbiamo effettuato le prime prove per assicurarci che le misurazioni avvenivano correttamente.

Prima di effettuare la prova per ogni singolo campione è stata effettuata la misura della Dark, la quale consente di valutare la risposta del sistema ad un ingresso nullo ed equivale dunque, a misurare il rumore di fondo dello strumento; successivamente è stata eseguita la Baseline che consente di misurare la risposta del sistema ad un ingresso massimo. In tabella 3 è riportata la configurazione utilizzata per le due misurazioni.

Misura	Raggio riferimento	Raggio campione
Dark	Pastiglia Spectralon	Vuoto
Baseline	Pastiglia Spectralon	Pastiglia Spectralon

Tabella 3: configurazione utilizzata per le misurazioni

Dopo aver effettuato le due misure iniziali si procede con la misurazione del campione da analizzare, lasciando la pastiglia Spectralon sul raggio riferimento ed il vetrino inserito nel supporto nel raggio campione, come si evince dalla figura 30.

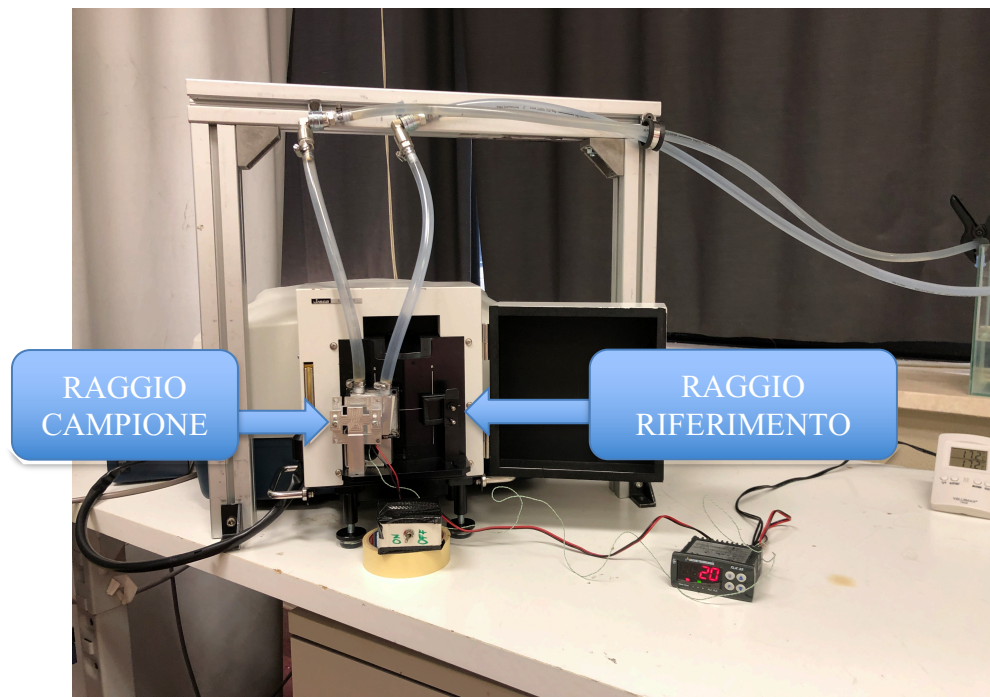


Figura 30: configurazione per misurazione campione

## 3.2 Setup Trasmissione

Le prove in trasmissione sono state effettuate con la sfera integratrice da 60mm termostata. In questo caso le misurazioni di Dark e Baseline che precedono le misurazioni sul campione sono eseguite facendo riferimento agli schemi in figura 31 e figura 32.

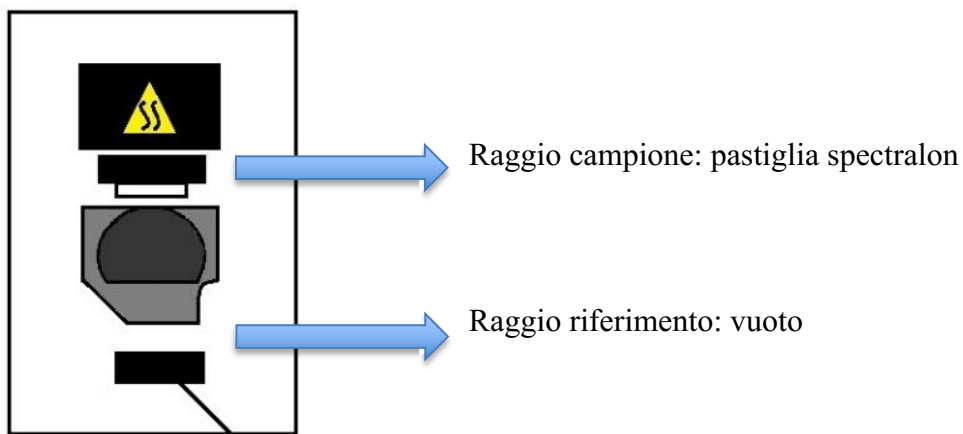


Figura 31: configurazione misurazione Dark

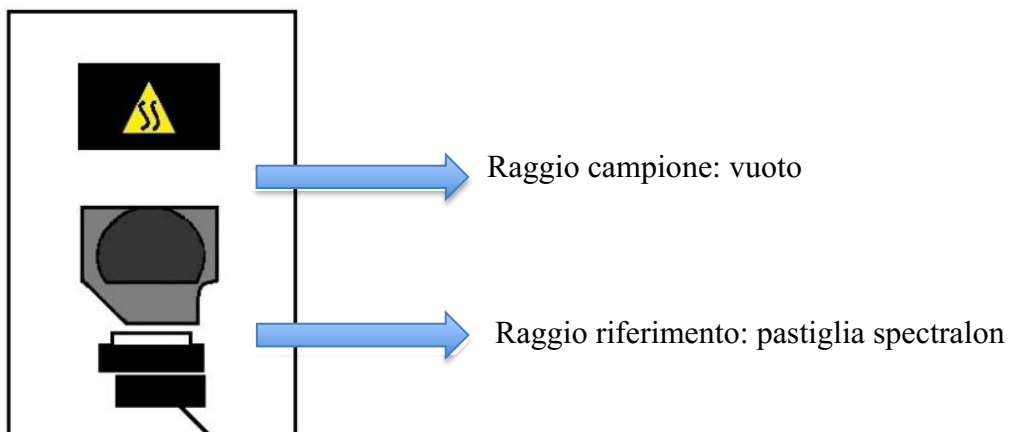


Figura 32: configurazione misurazione Baseline

Per la misurazione del campione da analizzare si fa riferimento allo schema illustrato in figura 33.

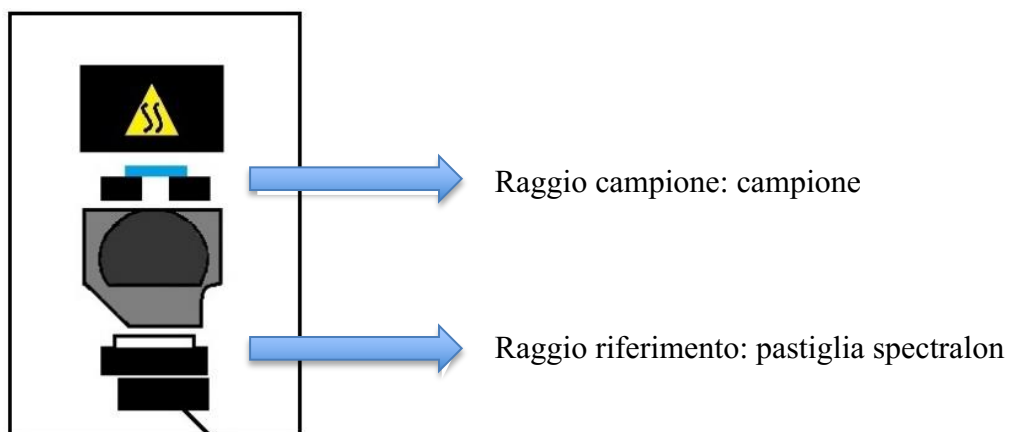


Figura 33: configurazione misurazione campione

## 4. Campioni analizzati

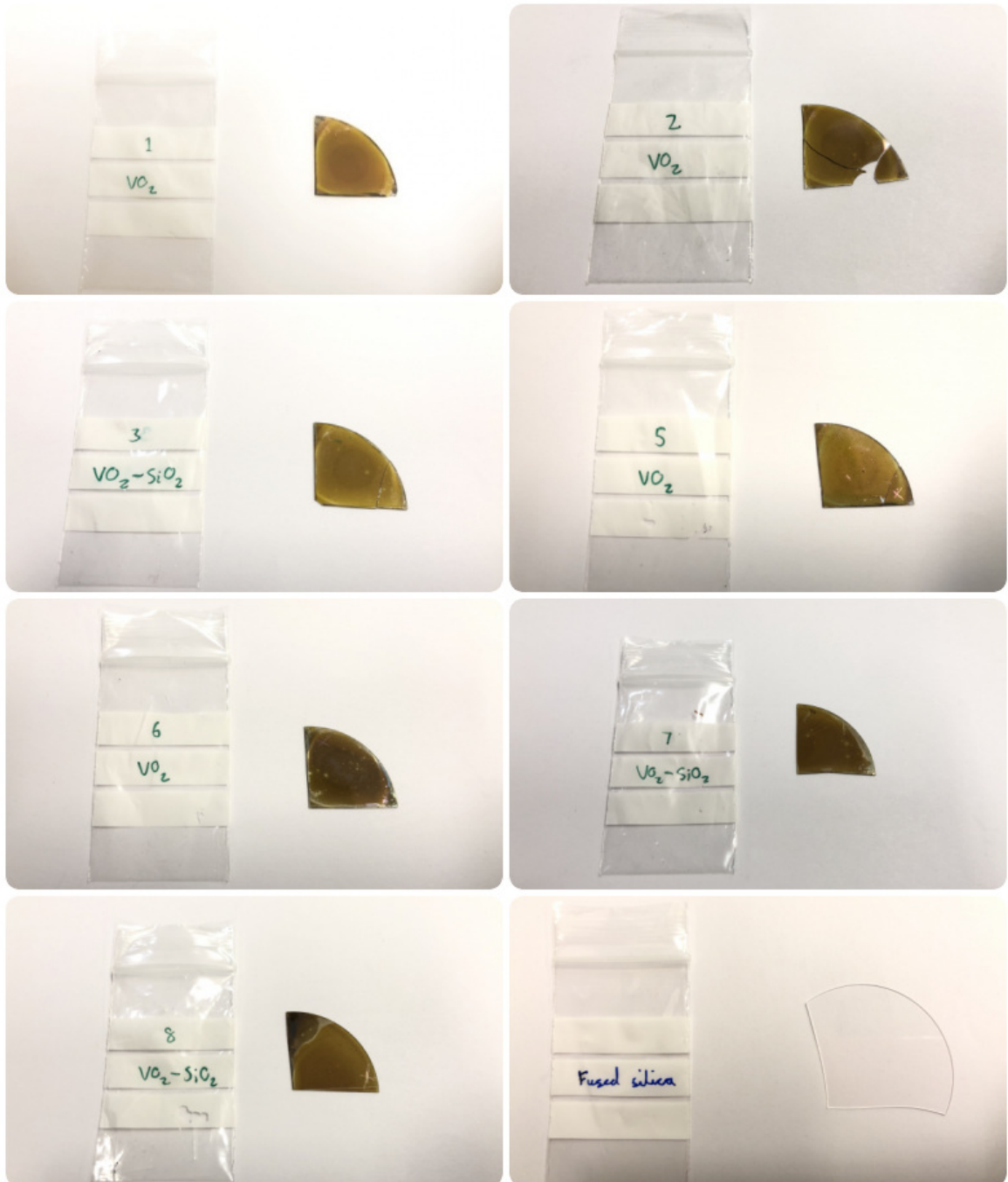


Figura 34: foto campioni analizzati e relative caratteristiche

Per realizzare le prove in riflessione e trasmissione abbiamo utilizzato i campioni mostrati in figura 34, tra i quali alcuni erano caratterizzati da ossido di vanadio ( $\text{VO}_2$ ) (campioni 1-2-5-6) altri (campioni 3-7-8) da ossido di vanadio ed aggiunta di silice ( $\text{VO}_2 - \text{SiO}_2$ )



che sono i componenti chimici in grado di variare la risposta dinamica del vetro ed infine è stato analizzato il campione “Fused Silica” che è costituito unicamente da silice.

Il primo obiettivo è stato di verificare il comportamento dei vetri al variare della temperatura; bisogna quindi conoscere gli spettri di riflessione, trasmissione ed assorbimento al variare della temperatura.

L’analisi effettuata si limita a lunghezze d’onda nell’intervallo che va dai 200 ai 2500 nm, poiché in questo range di trova la maggior parte della radiazione solare.

Si considera inoltre l’isteresi del coating depositato sui vetri poiché risulta che le proprietà variano in modo differente a seconda della tipologia e quantità di coating depositato e che la temperatura critica sia raggiunta in riscaldamento o in raffreddamento, come evidenziato in figura 35:

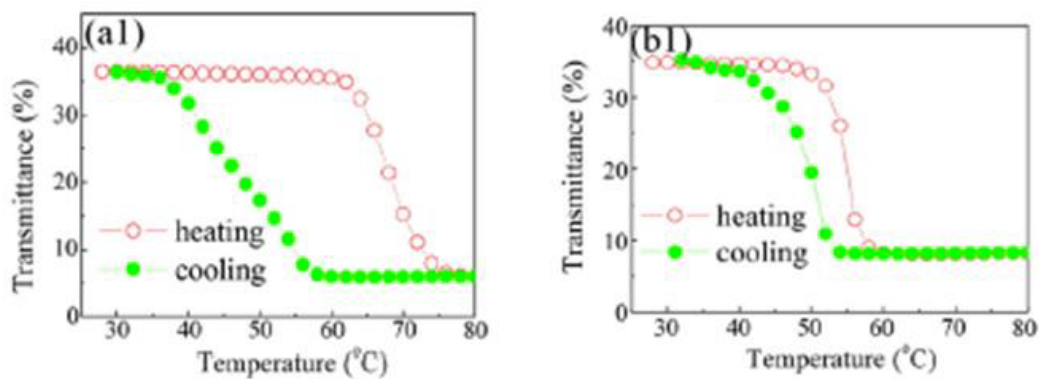


Figura 35: Esempio di curve d’isteresi larga (A1) e stretta (B1) di rivestimenti con ossido di vanadio (ZHANG, 2013)

La larghezza della curva di isteresi è un dato importante, in quanto a seconda dell’applicazione prevista è meglio che sia larga o stretta. Nel caso delle finestre intelligenti è preferibile una curva stretta che garantisca più affidabilità ed efficienza, ma per esempio applicazioni nel campo delle memorie digitali richiedono curve più ampie (Huafu Zhang, 2013). È stato stimato che in un clima temperato un vetro termocromico con bassa temperatura di transizione e piccola ampiezza d’isteresi può garantire un risparmio energetico del 54% rispetto ai vetri doppi convenzionali (Warwick, 2013).

Per confrontare le performance dei vetri termocromici rivestiti con ossido di Vanadio, sono state eseguite delle prove anche su un campione di vetro privo di trattamenti che è stato rinominato “Fused Silica”.



## 5. Prove sperimentali su campioni e analisi

### 5.1 Prove in riflessione

Le prove sono state realizzate usando il setup di misura descritto in figura 25, il sistema è risultato molto più solido e in tale modo abbiamo ridotto anche le incertezze.

Per ogni prova siamo partiti con le misurazioni di Dark e Baseline, successivamente è avvenuta la misurazione del campione da analizzare, partendo dalla temperatura di 20°C ed aumentando di 10°C per volta fino ad arrivare a 60°C, dopodiché le misure sono state effettuate aumentando di 2°C per volta sino ad arrivare alla temperatura di 90°C nominando con la dicitura “salita\_xx” i dati raccolti per ogni singola misurazione. Successivamente è stato eseguito il medesimo procedimento a ritroso partendo da 90°C per terminare le prove a 20°C e nominando i dati raccolti con la dicitura “discesa\_xx”. Per ogni misura lo spettrofotometro ha impiegato circa 7 minuti, al termine della misurazione il file è stato salvato sul pc; successivamente tramite il TLK si è proceduto variando la temperatura attendendo circa 1 minuto prima di effettuare la misurazione successiva in modo da stabilizzare la temperatura del vetro, dopodiché si è proceduto con la misurazione successiva alla temperatura impostata.

Lo stesso procedimento è stato eseguito fino al raggiungimento dei 90°C per poi eseguirlo a ritroso, diminuendo così la temperatura e ritornare ai 20°C di partenza.

Analizzando i dati ottenuti dai vari campioni si è notato che dopo una determinata temperatura avviene la transizione da stato freddo a caldo e ciò solitamente avviene a 68°C. Per i campioni caratterizzati da VO<sub>2</sub> il salto è molto più evidente, possiamo notare infatti che fino al raggiungimento della temperatura di transizione le curve sono tutte molto vicine; al raggiungimento della temperatura di transizione, con l'attivarsi del coating si nota un vero e proprio salto.

Nei campioni caratterizzati da VO<sub>2</sub> – SiO<sub>2</sub> è meno visibile il salto, anche se avviene la transizione, le curve ottenute dalle misurazioni restano molto vicine.

Analizzando i grafici si nota anche che a circa 1900-2000 nm è presente del rumore.

Abbiamo potuto subito appurare che al superare della T<sub>t</sub> (temperatura di transizione), l'ossido di Vanadio depositato sul campione, abbassi la sua riflettanza, ciò significa che

la radiazione infrarossa che cessa di essere trasmessa attraverso il vetro dopo la  $T_t$  venga assorbita dal vetro stesso e quindi non più riflessa; questo è il comportamento che ci aspettavamo dai vetri caratterizzati da ossido di vanadio.

Quanto descritto precedentemente non si verifica nel campione non caratterizzato “Fused Silica”, infatti l’andamento della curva di tale campione è pressoché simile a tutte le temperature.

Successivamente sono mostrati in figura gli spettri ottenuti dalla misurazione dei vari campioni in salita, nei quali si può ben notare il fenomeno descritto in precedenza.

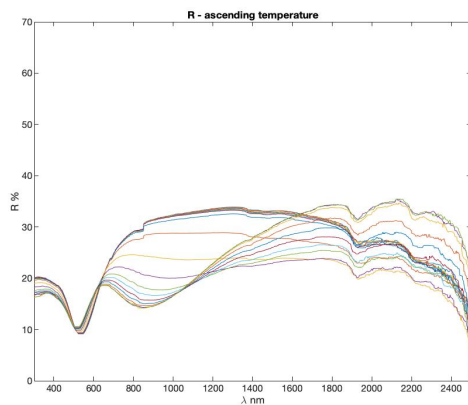


Figura 36: campione 1 ( $\text{VO}_2$ )

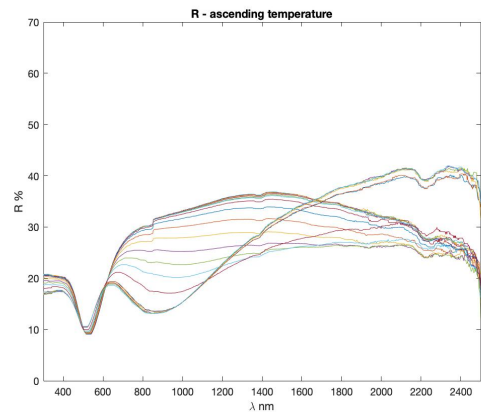


Figura 37: campione 2 ( $\text{VO}_2$ )

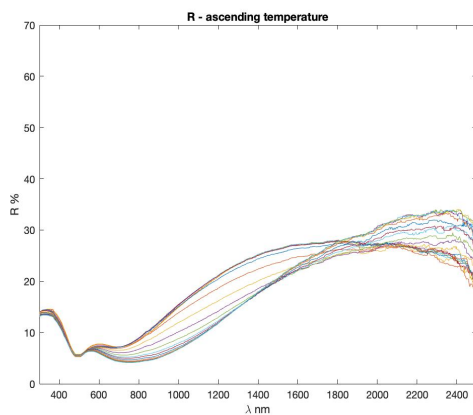


Figura 38: campione 3 ( $\text{VO}_2\text{-SiO}_2$ )

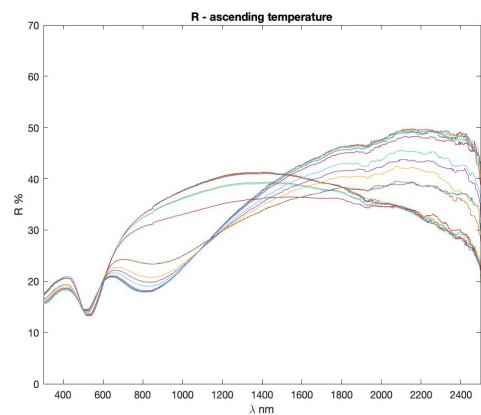


Figura 39: campione 5 ( $\text{VO}_2$ )

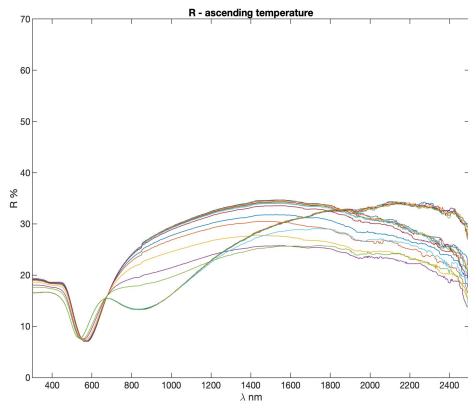


Figura 40: campione 6 ( $\text{VO}_2$ )

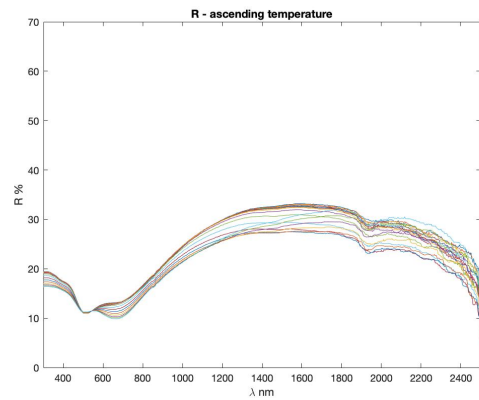


Figura 41: campione 7 ( $\text{VO}_2\text{-SiO}_2$ )

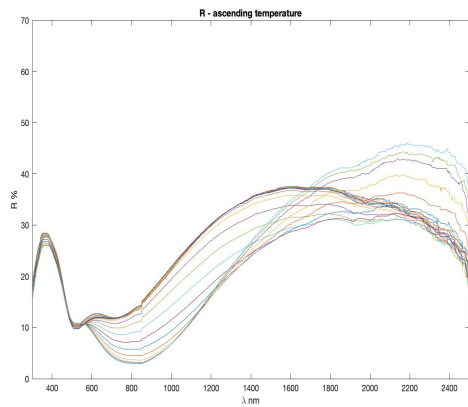


Figura 42: campione 8 ( $\text{VO}_2\text{-SiO}_2$ )

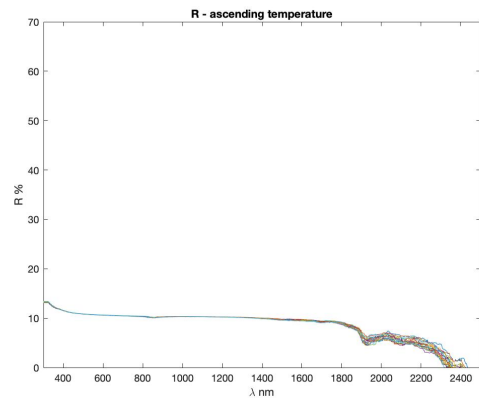


Figura 43: campione fused silica

Nella discesa possiamo ben notare come l'andamento rispetto alle misurazioni effettuate in salita varia, nonostante le curve seguono lo stesso andamento; anche in queste misurazioni il salto che avviene alla  $T_t$  è ben visibile poiché la radiazione immagazzinata dal vetro permette di ottenere curve molto vicine tra loro fino al raggiungimento della temperatura di transizione, dopo la quale il vetro passerebbe nella zona fredda e qui si nota una sorta di salto anche più accentuato rispetto a quello mostrato in salita.

Successivamente sono mostrati in figura gli spettri ottenuti dalla misurazione dei vari campioni in discesa.

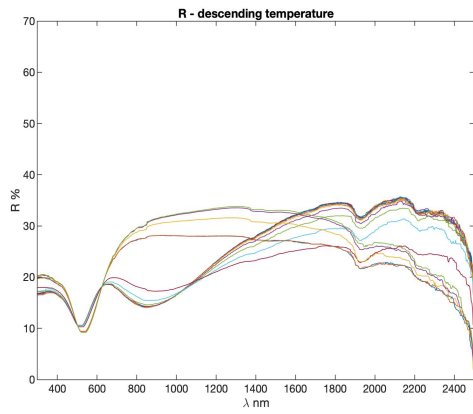


Figura 44: campione 1 (VO<sub>2</sub>)

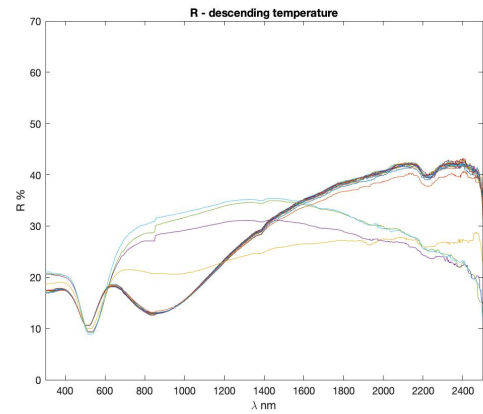


Figura 45: campione 2 (VO<sub>2</sub>)

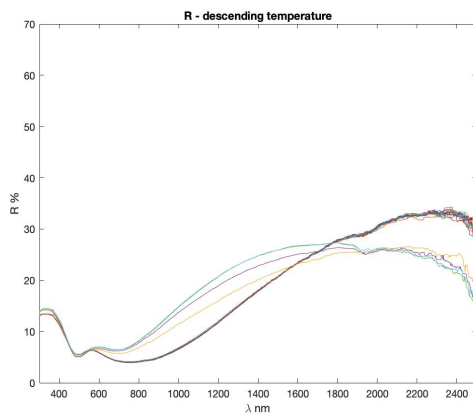


Figura 46: campione 3 (VO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>)

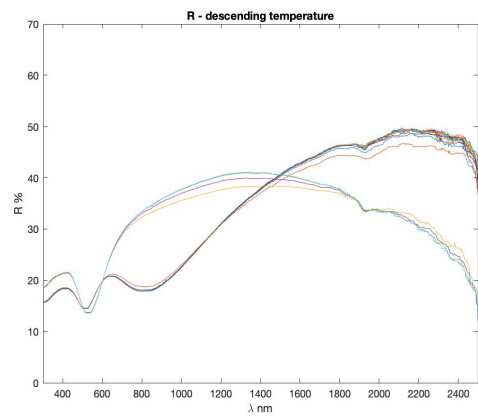


Figura 47: campione 5 (VO<sub>2</sub>)

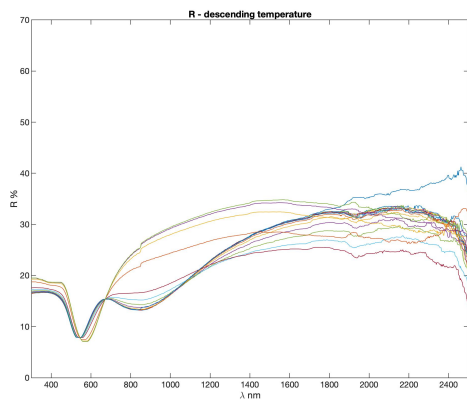


Figura 48: campione 6 (VO<sub>2</sub>)

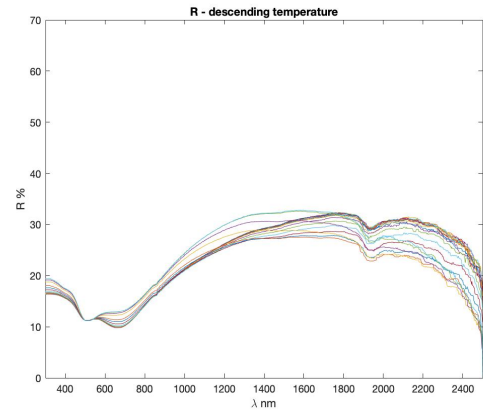


Figura 49: campione 7 (VO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>)

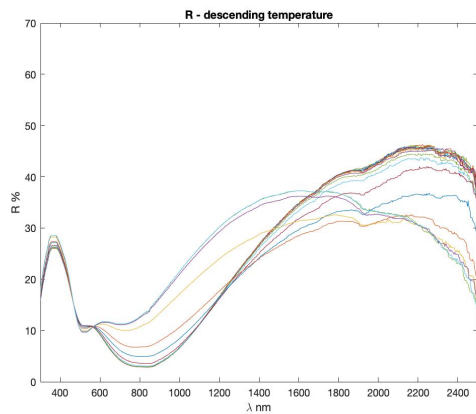


Figura 50: campione 8 ( $\text{VO}_2\text{-SiO}_2$ )

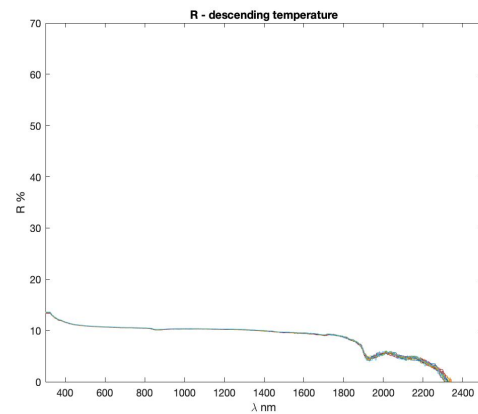


Figura 51: campione fused silica

Dai dati raccolti siamo riusciti a determinare la differenza di comportamento del vetro al riscaldarsi e al raffreddarsi, ossia l'isteresi. Si è voluto stabilire l'integrale delle curve di riflettanza alle diverse temperature, ottenuta sommando la riflettanza misurata ad ogni intervallo; si sono così costruite le curve d'isteresi.

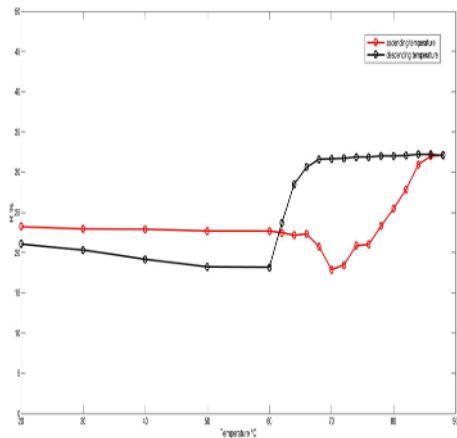


Figura 52: isteresi campione 1 ( $\text{VO}_2$ )

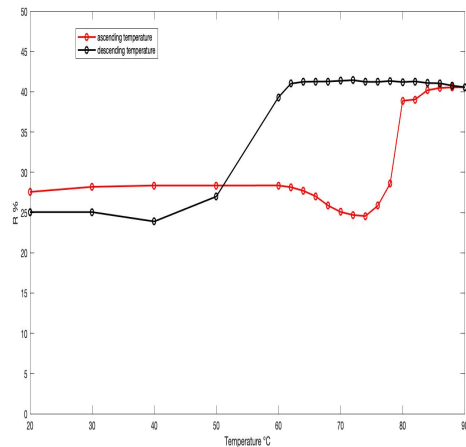


Figura 53: isteresi campione 2 ( $\text{VO}_2$ )

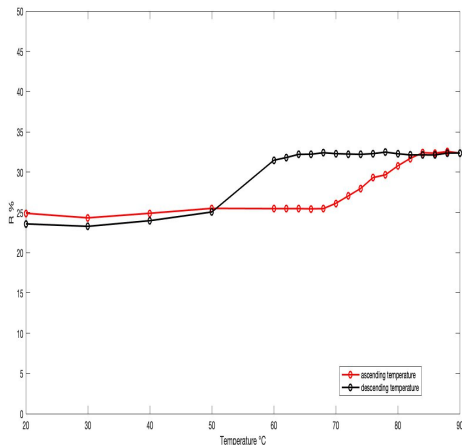


Figura 54: isteresi campione 3 ( $\text{VO}_2\text{-SiO}_2$ )

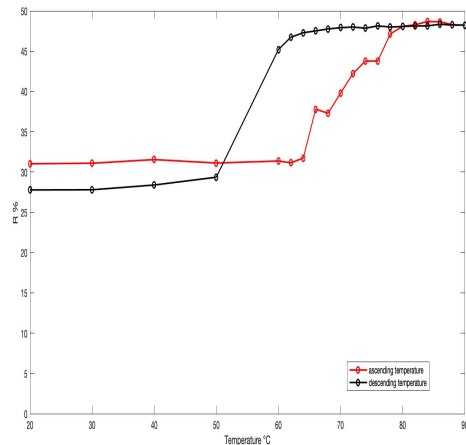


Figura 55: isteresi campione 5 ( $\text{VO}_2$ )

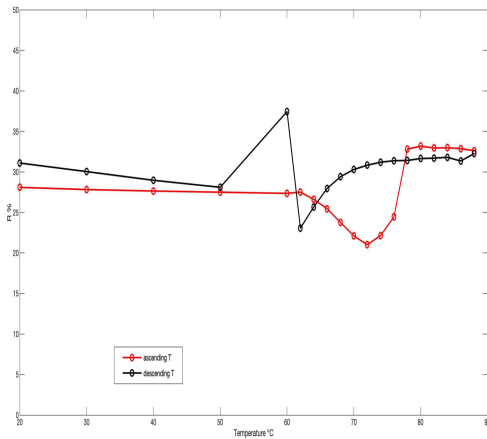


Figura 56: isteresi campione 6 ( $\text{VO}_2$ )

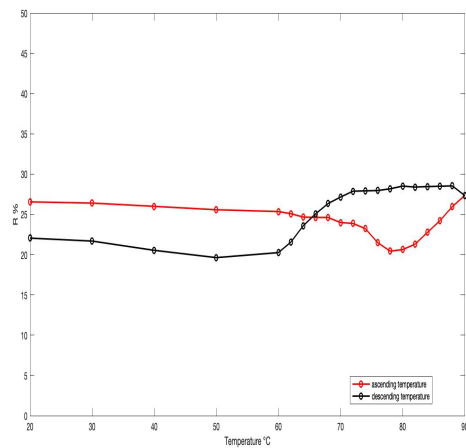


Figura 57: isteresi campione 7 ( $\text{VO}_2\text{-SiO}_2$ )

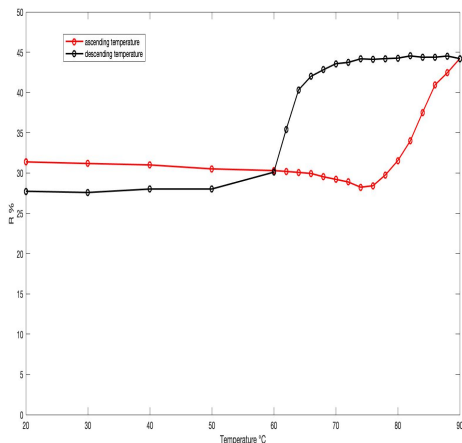


Figura 58: isteresi campione 8 ( $\text{VO}_2\text{-SiO}_2$ )

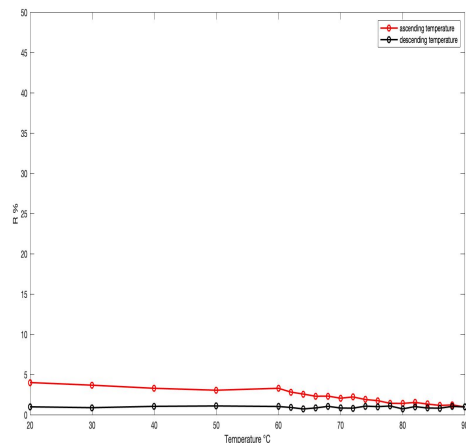


Figura 59: isteresi campione fused silica

Dai dati raccolti si possono confrontare le prestazioni tra i campioni caratterizzati da solo  $\text{VO}_2$  con quelli caratterizzati da  $\text{VO}_2 - \text{SiO}_2$  e dal campione fused silica.

Si può subito notare come la curva d'isteresi nei campioni 1-2-5 presenta un salto maggiore quindi sono questi i campioni che rispondono meglio al comportamento dinamico nel caso della riflettanza.

I campioni caratterizzati da  $\text{VO}_2\text{-SiO}_2$  (3-7) hanno una curva d'isteresi poco ampia, a differenza del campione 8 che presenta un salto maggiore rispetto agli altri.

Nel campione fused silica l'andamento non segue assolutamente le curve solite d'isteresi perché la riflessione è nulla.

## 5.2 Prove in trasmissione

Per le prove in trasmissione si è stabilito di monitorare il comportamento dei campioni al variare della temperatura fino a superamento della temperatura di transizione così da poter verificare lo stabilizzarsi delle prestazioni dei campioni termocromici.

Si è seguito il setup descritto nelle figure 31, 32 e 33, iniziando ogni prova con la misurazione di dark, baseline ed infine il campione da analizzare.

Le prove ci hanno mostrato che aumentando la temperatura, partendo da 20°C , il campione inizia gradualmente ad abbassare la trasmittanza infrarossa, inizialmente in maniera più graduale, ma all'attivarsi della temperatura di transizione si ha una sorta di scalino ed il fenomeno risulta molto evidente.

In figura sono mostrati gli spettri di trasmittanza in salita dei vari campioni.

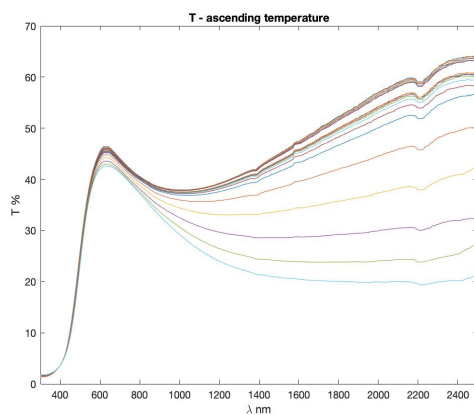


Figura 60: campione 1 ( $\text{VO}_2$ )

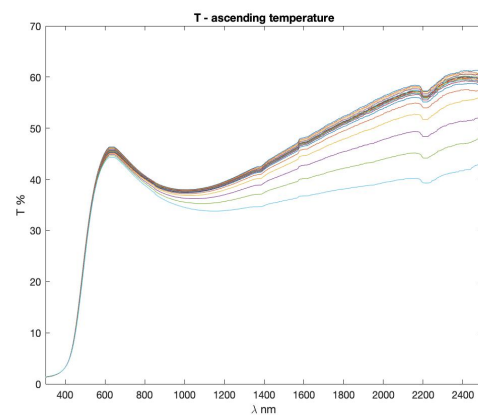


Figura 61: campione 2 ( $\text{VO}_2$ )

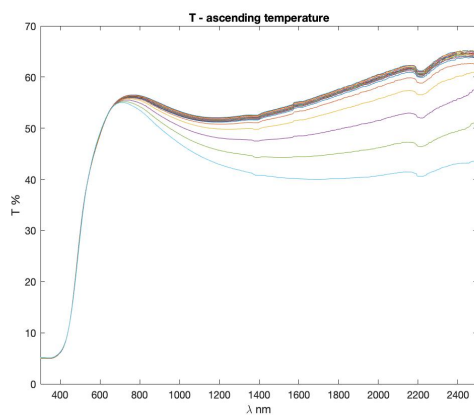


Figura 62: campione 3 ( $\text{VO}_2\text{-SiO}_2$ )

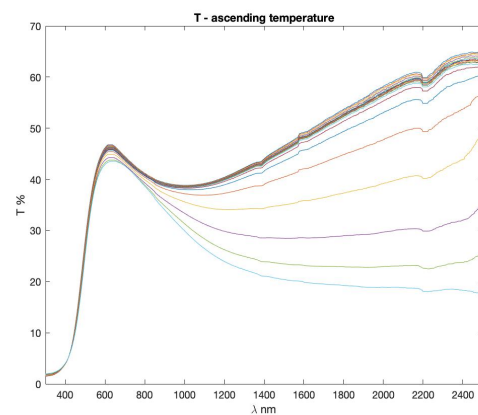


Figura 63: campione 5 ( $\text{VO}_2$ )



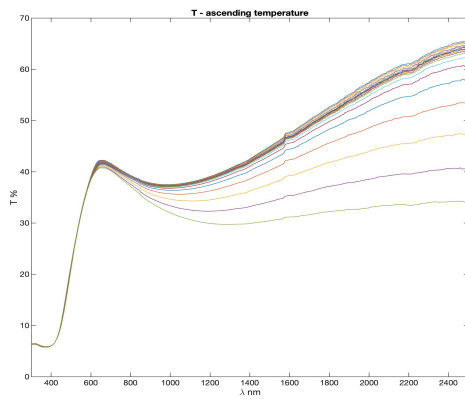


Figura 64: campione 6 ( $\text{VO}_2$ )

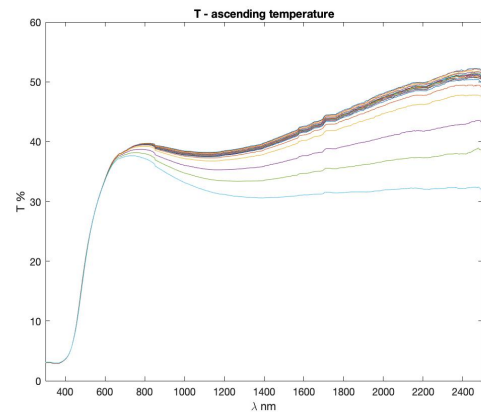


Figura 65: campione 7 ( $\text{VO}_2\text{-SiO}_2$ )

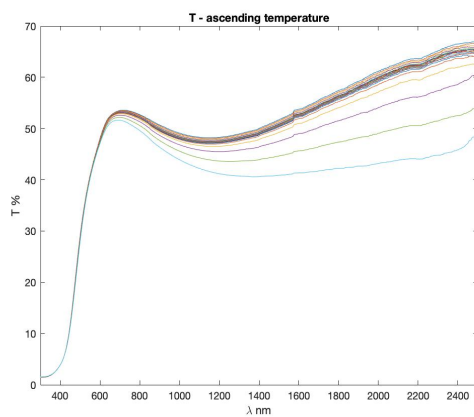


Figura 66: campione 8 ( $\text{VO}_2\text{-SiO}_2$ )

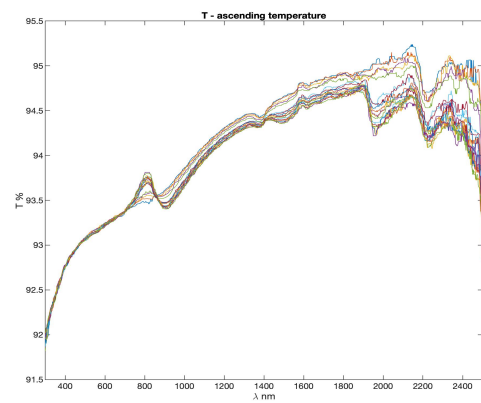


Figura 67: campione fused silica

Già dalle prove in salita si può notare un abbassamento della curva di trasmissione nell'infrarosso nei campioni analizzati; fenomeno molto accentuato nei campioni 1-5-6. Nel campione fused silica questo non accade, anche aumentando la temperatura lo spettro resta pressoché simile a tutte le temperature poiché il vetro non è caratterizzato.

Arrivati a  $90^\circ\text{C}$  si effettua il medesimo processo ma a ritroso, abbassando la temperatura da  $90^\circ\text{C}$  fino al raggiungimento della temperatura di  $20^\circ\text{C}$ ; siamo così in grado di ottenere i dati in discesa che uniti a quelli ricavati prima ci permettono di ottenere l'isteresi dei campioni analizzati.

Seguono in figura, gli spettri di trasmittanza in discesa dei vari campioni.

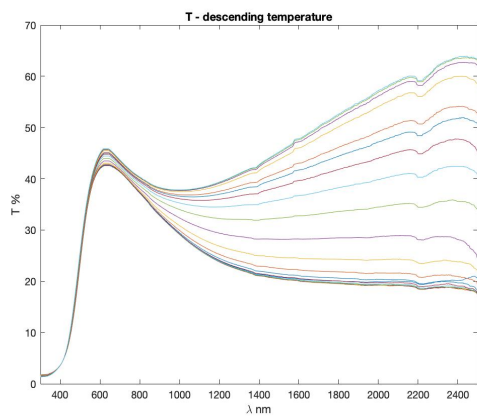


Figura 68: campione 1 ( $\text{VO}_2$ )

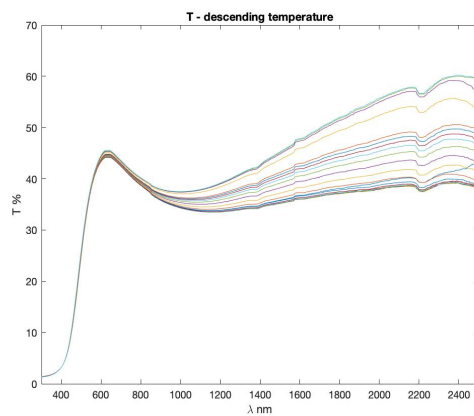


Figura 69: campione 2 ( $\text{VO}_2$ )

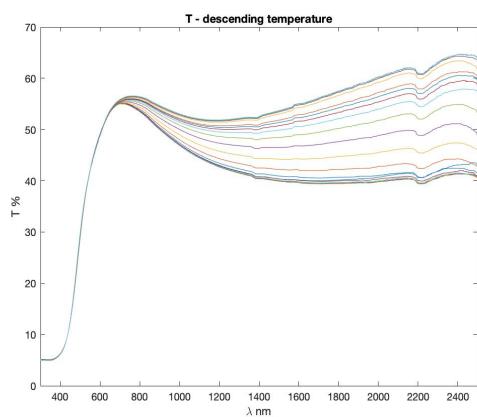


Figura 70: campione 3 ( $\text{VO}_2\text{-SiO}_2$ )

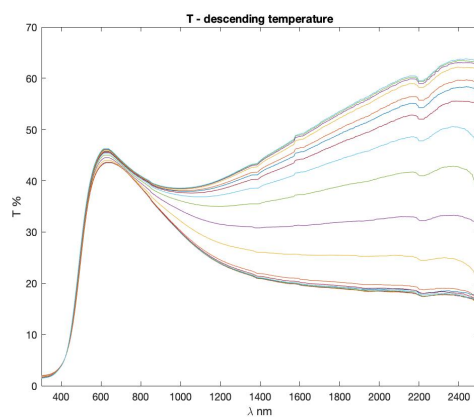


Figura 71: campione 5 ( $\text{VO}_2$ )

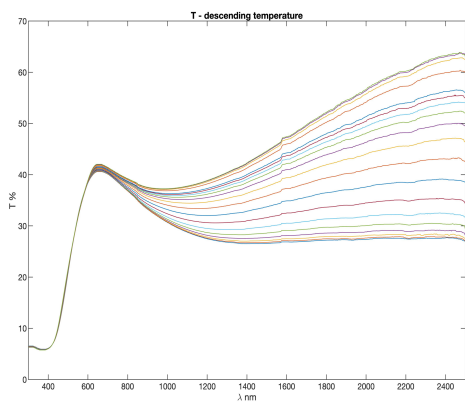


Figura 72: campione 6 ( $\text{VO}_2$ )

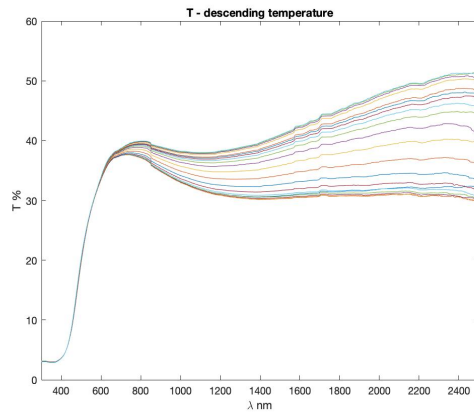


Figura 73: campione 7 ( $\text{VO}_2\text{-SiO}_2$ )

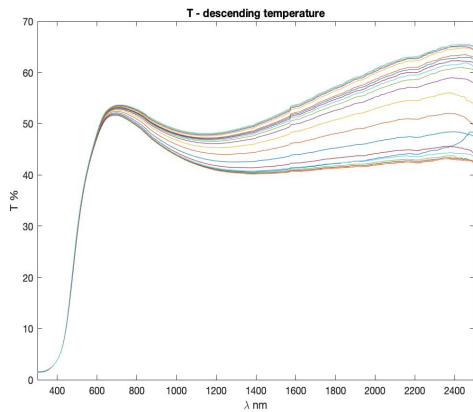


Figura 74: campione 8 ( $\text{VO}_2\text{-SiO}_2$ )

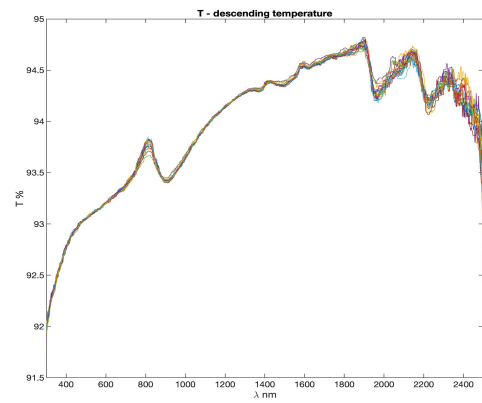


Figura 75: campione fused silica

Anche nelle prove in discesa si può ben notare come a temperature più elevate, stando quindi nella regione di stato caldo, oltre la temperatura di transizione, il livello di trasmittanza infrarossa è più basso rispetto alle condizioni in cui il campione si trovi allo stato freddo nel quale si nota chiaramente che la trasmittanza è maggiore.

Per valutare l'isteresi dei campioni analizzati abbiamo preso in considerazione la differenza tra salita e discesa; dopo aver analizzato gli spettri di trasmittanza in salita e discesa dei vari campioni si è proceduto con l'analisi dell'integrale delle curve di trasmittanza alle diverse temperature, ottenuta sommando la trasmittanza misurata ad ogni intervallo.

Si possono così costruire le curve di isteresi relative allo spettro visibile.

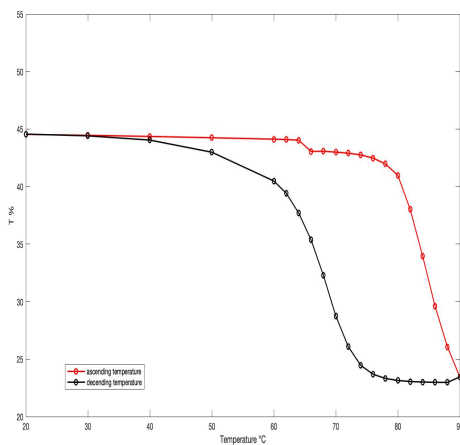


Figura 76: isteresi campione 1 ( $\text{VO}_2$ )

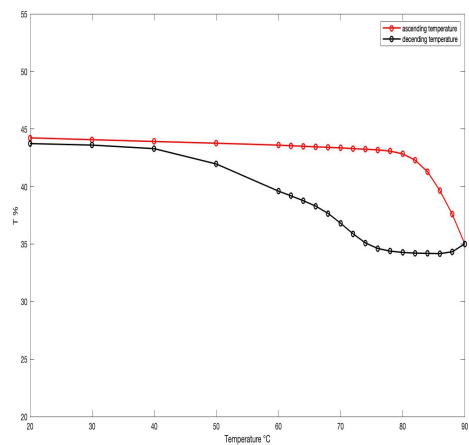


Figura 77: isteresi campione 2 ( $\text{VO}_2$ )

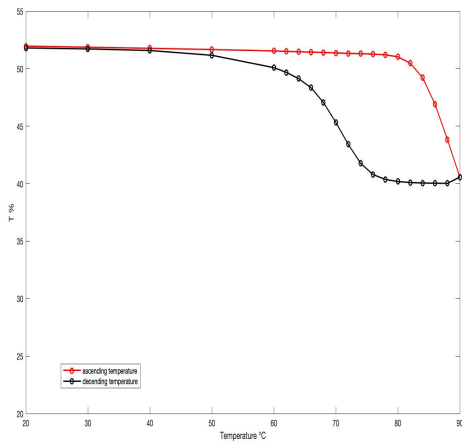


Figura 78: isteresi campione 3 ( $\text{VO}_2\text{-SiO}_2$ )

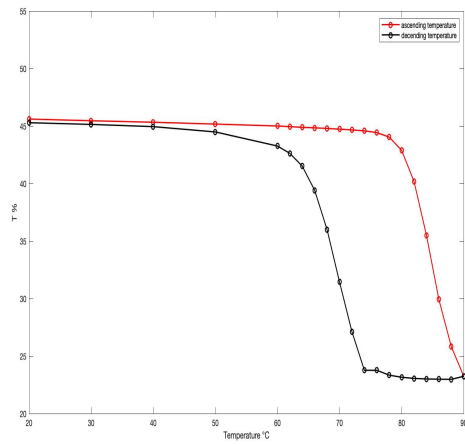


Figura 79: isteresi campione 5 ( $\text{VO}_2$ )

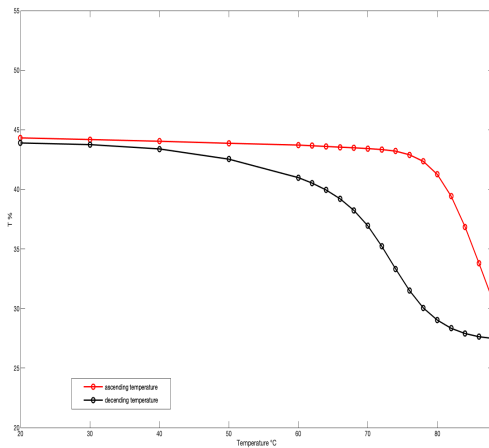


Figura 80: isteresi campione 6 ( $\text{VO}_2$ )

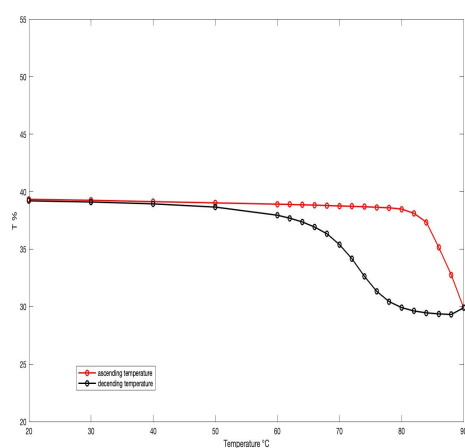


Figura 81: isteresi campione 7 ( $\text{VO}_2\text{-SiO}_2$ )

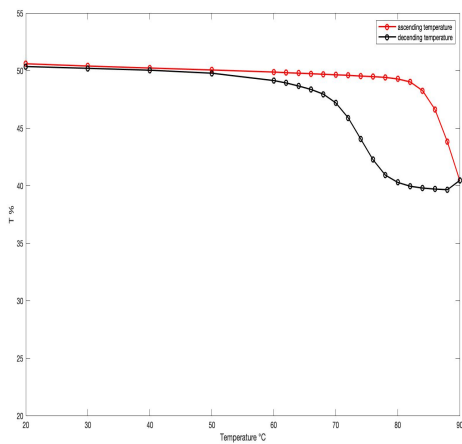


Figura 82: isteresi campione 8 ( $\text{VO}_2\text{-SiO}_2$ )

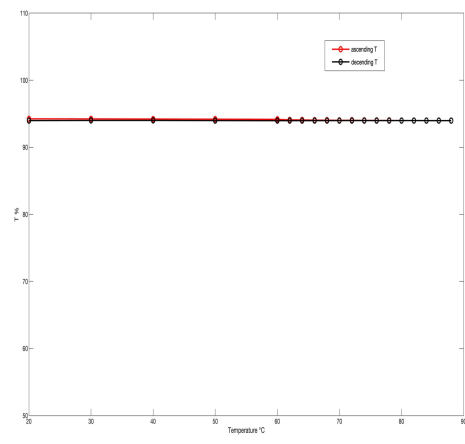


Figura 83: isteresi campione fused silica

Analizzando le curve d'isteresi ottenute si può affermare che i campioni che rispondono meglio al comportamento dinamico nel caso della trasmittanza sono i campioni 1-5 ; le curve d'isteresi ottenute da questi campioni riportano un salto maggiore.

Per il campione fused silica la curva d'isteresi è piatta perché non essendo caratterizzato, trasmette tutta la radiazione.

Per i campioni caratterizzati da  $\text{VO}_2\text{-SiO}_2$  si nota che la curva d'isteresi ha un salto meno accentuato rispetto ai campioni caratterizzati da  $\text{VO}_2$ ; in termini di prestazioni sono meno efficienti.

## 6. Conclusioni

Dopo aver realizzato un setup di misura compatto, in grado di ottenere misurazioni precise ed affidabili, è stata rilevata la temperatura di transizione  $T_t$  a circa 68°C; al superamento di tale temperatura l'ossido di vanadio che caratterizza il vetro muta le proprietà. In tabella 4 sono confrontati i valori di R% a 30°C ed a 84°C per i campioni analizzati.

	R% a 30°C	R% a 84°C	$T_t$
Campione 1 (VO <sub>2</sub> )	22,92	30,96	66°C
Campione 2 (VO <sub>2</sub> )	28,18	40,19	66°C
Campione 3 (VO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> )	24,33	32,41	68°C
Campione 5 (VO <sub>2</sub> )	31,09	48,69	64°C
Campione 6 (VO <sub>2</sub> )	27,82	32,99	64°C
Campione 7 (VO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> )	26,2	22,77	68°C
Campione 8 (VO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> )	31,18	37,53	68°C
Campione fused silica	3,66	1,31	-

Tabella 4: confronto R% a 30°C e 84°C

In tabella 5 sono confrontati i valori di T% a 30°C ed a 84°C.

	T% a 30°C	T% a 84°C	$T_t$
Campione 1 (VO <sub>2</sub> )	44,41	33,96	66°C
Campione 2 (VO <sub>2</sub> )	44,06	41,29	74°C
Campione 3 (VO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> )	51,87	49,22	76°C
Campione 5 (VO <sub>2</sub> )	45,14	35,5	74°C
Campione 6 (VO <sub>2</sub> )	44,18	36,85	72°C
Campione 7 (VO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> )	39,25	37,34	76°C
Campione 8 (VO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> )	50,39	48,25	76°C
Campione fused silica	94,23	93,98	-

Tabella 5: confronto T% a 30°C e 84°C

I dati elaborati ci hanno fornito dettagli importanti sul comportamento dinamico dei campioni caratterizzati da VO<sub>2</sub> (campioni 1-2-5-6) e dei campioni caratterizzati da VO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> (campioni 3-7-8); per le prove in riflettanza i campioni che reagiscono meglio sono i campioni 1-2-5-8 mentre per le prove in trasmittanza i campioni che reagiscono meglio sono i campioni 1-5 . In tabella 6 sono riportati i valori di  $\Delta R\%$  e  $\Delta T\%$  dei campioni analizzati.

	$\Delta R\%$	$\Delta T\%$
Campione 1 (VO <sub>2</sub> )	13,78	18,8
Campione 2 (VO <sub>2</sub> )	16,67	8,69
Campione 3 (VO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> )	6,94	11,08
Campione 5 (VO <sub>2</sub> )	15,57	20,7
Campione 6 (VO <sub>2</sub> )	9,87	12,31
Campione 7 (VO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> )	7,75	8,56
Campione 8 (VO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> )	15,93	9,07
Campione fused silica	1,40	0,05

Tabella 6

Confrontando ed unendo i dati ricavati dalle due prove, il campione che presenta un salto maggiore in entrambe le misurazioni è il campione 5; sicuramente è il campione che garantisce una risposta dinamica migliore ed è quello che potrebbe essere utilizzato per un la realizzazione di grandi vetrate in modo da ottenere un risparmio energetico ed economico.

Al termine di questo lavoro, il mio auspicio è che possano essere sviluppate e commercializzate presto vetrate intelligenti in modo da ridurre drasticamente le emissioni e contribuire all'annullamento dell'inquinamento.





## Bibliografia:

*Pm 10, sono le caldaie le principali fonti d'inquinamento:*

<https://www.infodata.ilsole24ore.com/2018/12/21/pm10-le-caldaie-le-principali-responsabili-dellinquinamento/>

*Uno studio comparativo sulle emissioni di apparecchi a gas, GPL, gasolio e pellet:*

<http://www.arpat.toscana.it/notizie/arpatnews/2018/025-18/uno-studio-comparativo-sulle-emissioni-di-apparecchi-a-gas-gpl-gasolio-e-pellet>

*Struttura VO<sub>2</sub>:*

<https://science.energy.gov/bes/highlights/2015/bes-2015-03-a/>

*Spectrophotometric analysis of vanadium oxide coated glasses for smart solar control,*  
tesi di Pietro D'amico, 2017

*Characterization of thermochromic glasses,*  
tesi di Pietro Lausdei , 2019