

**Università degli studi di Padova**

**Facoltà di Ingegneria**

**Indirizzo meccanica e maccatronica, curriculum meccatronico**

**SISTEMA AUTOMATIZZATO IN LINEA  
PRODUTTIVA PER L'ANALISI  
DELL'ATMOSFERA ALL'INTERNO DI  
VETROCAMERE**

---

COMPLETELY AUTOMATIZED MACHINERY IN PRODUCTION  
LINE FOR THE ANALYSIS OF THE ATMOSPHERE INSIDE IN-  
SULATING GLASS UNITS

***Relatore: Sona Alessandro***

***Studente: Davanzo Matteo***

Vicenza, 2016



---

# INDICE

---

<b>INDICE</b> .....	3
<b>INTRODUZIONE</b> .....	5
1. Contesto.....	5
2. Obbiettivi.....	6
3. Problematiche.....	6
<b>CAPITOLO 1 - Il vetrocamera</b> .....	7
1. Cos'è il vetrocamera e perché si utilizza.....	7
2. Tipologie di vetro.....	8
3. Tipologie di telai distanziatori.....	8
4. Tipologie di sigillanti.....	10
5. Tipologie di gas utilizzati.....	11
6. Configurazioni più utilizzate.....	12
<b>CAPITOLO 2 - Produzione del vetrocamera</b> .....	15
1. Tecniche per il riempimento dei pannelli.....	15
1.1. Riempimento tramite foratura del telaio distanziatore.....	15
1.2. Riempimento durante la pressatura.....	17
2. La linea di produzione.....	19
3. L'accoppiatore/pressa APG Forel.....	21
<b>CAPITOLO 3 - Analizzatori della concentrazione di gas</b> .....	29
1. Strumenti invasivi.....	29
1.1. Struttura del sensore.....	30
1.2. Pregi e difetti degli strumenti invasivi.....	31
2. Strumenti non invasivi.....	34
2.1. Struttura del sensore.....	34
2.2. Pregi e difetti degli strumenti non invasivi.....	34
3. L'analizzatore di gas Sparklike Laser.....	36
3.1. Struttura e funzionamento dell'analizzatore.....	36
3.2. Pregi e difetti.....	40

<b>CAPITOLO 4 - Integrazione dello strumento in linea</b> .....	43
1. Progettazione del sistema.....	43
2. Adeguamento dello strumento.....	44
3. Movimento orizzontale.....	45
4. Asse verticale.....	47
5. Ciclo del sistema.....	50
6. Prove.....	51
7. Miglioramenti al progetto iniziale.....	53
<b>CONCLUSIONI</b> .....	57
<b>Bibliografia</b> .....	59
<b>Ringraziamenti</b> .....	60

# INTRODUZIONE

L'oggetto della presente tesi è lo studio di un'applicazione che consenta l'analisi automatizzata dell'atmosfera all'interno dei pannelli di vetrocamera durante la produzione degli stessi, nello specifico l'intento è quello di analizzare e risolvere le varie problematiche in primis riguardo l'esecuzione della misura stessa, e in seguito quelle comportate dall'applicazione in linea dello strumento ritenuto più adatto ed efficace per questo scopo.

## 1. Contesto

Nell'odierno settore edilizio è sempre più alta la richiesta di prodotti tecnologicamente all'avanguardia, e per quanto riguarda il settore di produzione del vetro questo ha significato lo sviluppo di vetrate con potere isolante maggiore, grazie anche all'utilizzo di gas diversi dall'aria all'interno dei pannelli di vetrocamera, come ad esempio Argon oppure Krypton. L'utilizzo dei gas ha comportato benefici sensibili sul risparmio energetico e sulla costruzione di edifici ecosostenibili, ma anche normative, regolamentazioni e richieste di garanzia di qualità dei prodotti. Nella presente tesi si fa riferimento alle norme UNI EN 1279-1/6 (recepimento delle norme europee EN 1279-1/6) nelle quali sono determinati i valori delle tolleranze della concentrazione di gas iniziale presente nell'intercapedine, della massima perdita annua di gas dal pannello ed inoltre i metodi per la misurazione e il controllo di questi valori, ed la UNI EN ISO 10077 (recepimento della norma internazionale ISO 10077) che determina il metodo di calcolo della trasmittanza termica dei serramenti e ne stabilisce il limite minimo, entrambe valide per il regolamento europeo CPR 305/2011 che tratta la marchiatura CE dei prodotti da costruzione. In particolare dalla combinazione della UNI EN ISO 10077 con la UNI EN 1279-3 emerge che a distanza di 10 anni dalla produzione di un pannello esso debba contenere un volume di gas nell'intercapedine non inferiore all'85% del volume totale, e sempre dalla UNI EN 1279-3 il valore massimo di perdita di gas annua è di 1% della concentrazione iniziale, il che porta a richiedere una concentrazione di gas iniziale di circa 95% del volume dell'intercapedine.

Queste richieste hanno comportato, con effetto a catena, la responsabilizzazione dei costruttori di attrezzature per la produzione del vetrocamera e la richiesta di macchinari e tecnologie per il riempimento dei pannelli e il controllo di qualità più efficienti. Tuttavia ad oggi non è ancora stato raggiunto un compromesso tra il mantenimento dell'alta produttività e la garanzia di produrre vetrocamere performanti, ottenuta tramite un controllo puntuale sul processo o sui prodotti finiti.

## 2. Obiettivi

L'obiettivo del progetto è la realizzazione di un sistema totalmente automatizzato per il controllo della concentrazione del gas con cui i pannelli di vetrocamera vengono riempiti, e la sua integrazione all'interno di linee di produzione automatiche. In particolare, il sistema deve essere indipendente dalla presenza di un operatore (quindi lo strumento dovrà dialogare con il software gestionale della linea produttiva) e deve effettuare una media della concentrazione sufficientemente accurata per ogni pannello prodotto, senza però influire sulla produttività. L'interfaccia con il software gestionale deve far sì che i dati raccolti consentano a quest'ultimo di segnalare un pannello difettoso e, a discrezione dell'operatore, arrestare la linea; inoltre deve poter trasferire i dati acquisiti dallo strumento a periferiche di output, come schermi o anche stampanti o etichettatrici se presenti.

## 3. Problematiche

Le problematiche riscontrate per la realizzazione di questo progetto sono poste su due livelli:

Problematiche relative alla scelta della metodologia di analisi e dello strumento di misura:

- il sistema di analisi deve essere il più efficace ed efficiente possibile, cioè deve garantire il minor spreco di materiale o prodotto finito possibile;
- l'analisi effettuata non deve perturbare o, peggio ancora, essere distruttiva, per il campione in analisi o per lo strumento di misura stesso;
- lo strumento deve essere il più versatile possibile, vale a dire che deve poter effettuare misurazioni attendibili indifferentemente dalle svariate tipologie di pannelli prodotti (differenti tipi di vetro o di gas, differenti tipi di configurazione del pannello).

Problematiche relative all'integrazione del sistema in linea:

- scelta di uno strumento di misura sufficientemente veloce, in modo da non ridurre la produttività della linea;
- studio del sistema più efficiente per applicare lo strumento in linea in modo che sia adattabile a tutte le dimensioni dei pannelli prodotti;
- sviluppo dell'integrazione e della comunicazione tra il sistema di analisi e gli altri macchinari componenti la linea.

# CAPITOLO 1

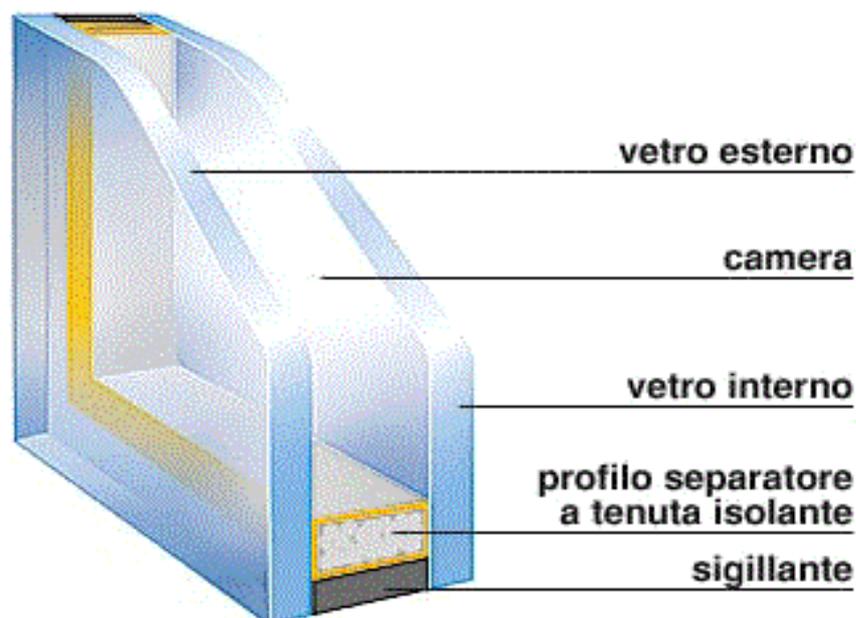
## Il vetrocamera

In questo capitolo viene esaminato l'oggetto dell'analisi effettuata dallo strumento, in particolare vengono elencate le svariate tipologie di materiali e configurazioni utilizzati per la sua produzione, allo scopo di chiarire la quantità di variabili che complicano l'universalizzazione del sistema.

### 1. Cos'è il vetrocamera e perché si utilizza

Uno dei materiali fondamentali per l'edilizia moderna, che mira al risparmio energetico e al basso impatto ambientale, è il vetro, nella fattispecie le vetrate isolanti o vetrocamera, che permettono un miglior isolamento termico ed anche acustico dell'ambiente interno rispetto alle vetrate cosiddette vetrate monolitiche, mantenendone la caratteristica trasparenza alla radiazione luminosa nello spettro della luce visibile.

L'idea che sta alla base della costruzione del vetro isolante è quella di sfruttare materiali con conducibilità termica minore rispetto al vetro, creandone uno strato e racchiu-



*Fig 1.1: Esempio schematico di vetrata isolante*

dendolo tra due lastre separate da un telaio distanziatore. Ovviamente tali materiali, oltre ad avere il coefficiente di scambio termico più basso possibile, devono essere trasparenti, per cui le sostanze migliori per la creazione di tale strato sono i gas incolori.

Una volta riempita la camera con il gas (se necessario, poiché nel vetrocamera più tradizionale si utilizza semplicemente aria) e completato l'assemblaggio e la pressatura dei componenti, il pannello è infine sigillato lungo tutto il perimetro esterno in modo da garantire la tenuta contro perdite di gas o infiltrazioni di vapore acqueo all'interno della camera, inoltre il sigillante aiuta a tenere unite le due lastre.

Il pannello così costruito può essere utilizzato per comporre intere facciate di edifici (questa tipologia di vetrate prende il nome di "strutturale"), oppure essere inserito in un telaio, tipicamente in legno, alluminio o PVC, per andare a formare i serramenti.

## 2. Tipologie di vetro

Il vetro per l'edilizia è di vari tipi: oltre a quello piano semplice, sul mercato stanno prendendo piede sia le vetrate cosiddette basso-emissive, che sono lastre di vetro sulla cui superficie viene posato, mediante tecniche di nanotecnologia, un film d'argento e di ossidi di altri metalli per migliorarne notevolmente le caratteristiche di isolamento termico preservandone in buona parte le caratteristiche di trasparenza alla luce (il vetro basso emissivo può risultare leggermente colorato a causa del trattamento superficiale), sia le vetrate stratificate antisfondamento, lastre costituite da due o più strati di vetro intercalati da un foglio di materiale plastico, in genere polivinilbutirrale (PVB), utilizzate per particolari esigenze di sicurezza in quanto se fratturate restano compatte (un

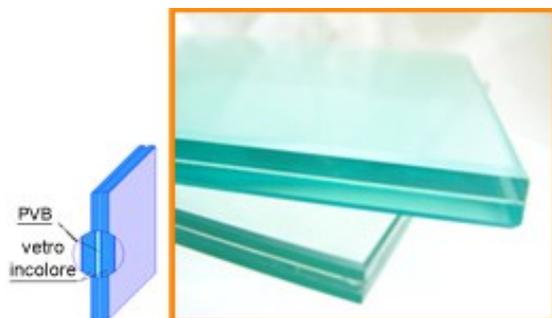


Figura 1.2: Vetro stratificato



Figura 1.3: vetro normale (a sinistra) e basso emissivo a confronto

esempio di applicazione nella vita quotidiana è il parabrezza delle automobili). A questi si aggiungono varie altre tipologie meno diffuse come il vetro satinato, il vetro temprato ed altri.

## 3. Tipologie di telai distanziatori

Il telaio tradizionale è costituito da un profilato di alluminio a sezione rettangolare cava, che viene piegato, sagomato e tagliato a seconda delle dimensioni e della forma della

vetrata da realizzare. La sezione è cava perché, se utilizzato per la costruzione di vetrocamera tradizionale con aria al suo interno invece che gas, essa deve essere riempita di materiale desiccante per evitare spiacevoli fenomeni di condensazione del vapore acqueo presente nella camera sebbene in concentrazione modesta all'atto della fabbricazione. Per poter assemblare lastre e profilo, quest'ultimo deve essere cosparso di butile, un sigillante ad alta tenuta, sulle facce a contatto con il vetro.

Le varie lavorazioni di cui necessita il profilo in alluminio, ma soprattutto il suo elevato



*Fig. 1.4: Profili in alluminio tradizionali*

coefficiente di conducibilità termica lineare che lo rende un ottimo conduttore di calore, hanno portato allo sviluppo di nuovi distanziatori detti “warm edge”. Di questa categoria fanno parte tutti i distanziatori con coefficiente di conducibilità termica lineare sensibilmente inferiore a quella dell'alluminio e che quindi contribuiscono ad abbattere il ponte termico al bordo del serramento (da cui il nome, che letteralmente significa “bordo caldo”). Si dividono in tre gruppi:

- distanziatori in acciaio inossidabile;
- distanziatori combinati plastica/metallo, composti da una struttura metallica di basso spessore (inox o alluminio) accoppiata con materiali plastici, come policarbonati o polipropilene;
- distanziatori flessibili, di tipo “butilico” applicati a caldo come il ThermoPlastic Spacer TPS, oppure “siliconico” applicati a freddo come il SuperSpacer SS o il Triseal.

I primi due devono essere lavorati come i profili in alluminio, mentre gli ultimi sono quelli che comportano i maggiori miglioramenti perché hanno il miglior potere isolante e non necessitano di essere lavorati, escluso ovviamente il taglio per il SS e l'estrusione per il TPS. Di contro, hanno una minore stabilità meccanica rispetto all'acciaio inox o ai metalli in genere.

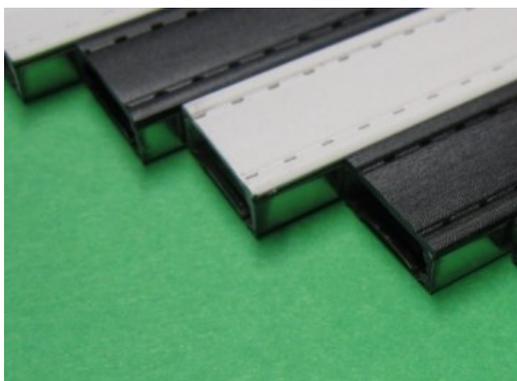


Fig. 1.5: CHROMATECH Ultra



Fig. 1.6: Saint Gobain Swisspacer



Fig. 1.7: EDGETECH SS



Fig. 1.8: TPS

*Nelle immagini sopra sono presentati vari esempi di distanziatori "warm edge", in particolare si noti che i primi due sono di tipo combinato plastica-metallo e hanno sezione cava, mentre in basso a sinistra c'è il SuperSpacer, flessibile di tipo siliconico, e a destra il TPS, di cui si può notare nell'angolo la tipica giunzione data dall'estrusione a caldo direttamente sulla lastra di vetro per mezzo di robot.*

#### 4. Tipologie di sigillanti

Dopo l'applicazione del distanziatore e la costituzione del vetrocamera vero e proprio, esso è infine sigillato lungo il perimetro esterno (v. fig. 2.1), questo per isolare completamente la camera dall'ambiente esterno. Tale isolamento previene in primis gli scambi di calore tra camera e ambiente, impedendo sia la convezione che il passaggio di aria,

ostacola le perdite di gas nel caso di pannelli riempiti con gas isolanti, e inoltre aumenta l'integrità strutturale della vetrata contribuendo a tenere unite le due lastre. I sigillanti utilizzati sono di vario tipo: i più diffusi sono sigillanti bicomponente, composti da un prodotto base che viene miscelato ad un catalizzatore per far sì che si indurisca rapidamente; di questa categoria fanno parte i polisolfuri, i siliconi e i poliuretani. L'alternativa ai bicomponenti è costituita dal cosiddetto "hot melt" che, come suggerisce il nome, viene estruso a caldo: a temperatura ambiente questo sigillante si trova in forma solida (in genere viene commercializzato sotto forma di cubi), e quando deve essere applicato viene riscaldato a circa 150° C, facendolo diventare un fluido viscoso e rendendolo applicabile al pannello di vetrocamera. L'estrusione e l'applicazione di questi sigillanti può essere manuale o totalmente automatizzata per mezzo di robot (aumentando la qualità della sigillatura).

## 5. Tipologie di gas utilizzati

L'ultimo materiale degno di nota per la produzione di vetrocamera, e parte fondamentale per la presente tesi, è il gas con cui viene riempito.

In origine la camera fu pensata per creare il vuoto al suo interno, dato che è il miglior isolante possibile per il fatto che esclude per sua natura fenomeni termici sia conduttivi che convettivi, ma per motivi economici e per la deformazione subita dalle lastre sottoposte alla pressione esterna dell'aria, deformazione che potrebbe portare anche a rotture, tale soluzione è sempre stata accantonata. Solo negli ultimi anni sta tornando in auge l'idea di creare il vuoto all'interno dei pannelli, anche grazie allo sviluppo di microtecnologie in grado di produrre minuscole pile quasi invisibili di materiale vetroso, da applicare all'interno della camera come distanziatori tra le lastre, tipicamente con disposizione a matrice di lati 2 cm x 2 cm.

Tradizionalmente la camera conteneva aria, intrappolata durante il processo di accoppiamento delle lastre. Successivamente, a partire dagli anni '80, per perfezionare le proprietà isolanti del vetro camera l'aria venne sostituita con dei gas, dapprima esafluoruro di zolfo, poi, in seguito al protocollo di Kyoto e ad un decreto della comunità europea che vieta l'immissione in commercio di vetrate contenenti gas ad effetto serra, questo è stato sostituito con gas nobili e chimicamente inerti, principalmente Argon per il suo basso costo, ma anche Krypton, Xenon o miscele di questi quando si vogliono ottenere prestazioni isolanti migliori. Il miglioramento del potere isolante del serramento riempito con Argon rispetto a quello con aria è notevole: il coefficiente di conducibilità termica dell'aria è  $2.496 \times 10^{-2} \text{ W/m K}$ , mentre quello dell'Argon è  $1.684 \times 10^{-2} \text{ W/m K}$ . L'utilizzo di Krypton e Xenon comporta isolamenti ancora più elevati (i coefficienti di conducibilità termica sono rispettivamente  $0.900 \times 10^{-2} \text{ W/m K}$  e  $0.529 \times 10^{-2} \text{ W/m K}$ ),

ma il loro costo è molto più alto rispetto all'Argon (il rapporto è rispettivamente di 1 a 100 e di 1 a 400).

Il gas viene insufflato nella camera tramite processi automatizzati integrati nella linea di produzione oppure, in qualche caso ormai raro, manualmente per mezzo di appositi carica-gas.

## **6. Configurazioni più utilizzate**

I vari materiali sopra descritti possono essere accoppiati in differenti combinazioni a formare varie tipologie di vetrocamera.

La più semplice è il pannello doppio, composto da due lastre di vetro float, solitamente di spessore variabile tra i tre e gli otto millimetri, separate da uno qualsiasi dei telai distanziatori sopra elencati.

Per ottenere coefficienti di isolamento più elevati vengono utilizzati pannelli tripli, composti da tre lastre di vetro inframezzate da due profili. Virtualmente il numero di camere potrebbe essere aumentato a dismisura, ma nella pratica si arriva al massimo a vetrate quaduple (con tre camere).

Nel caso di utilizzo di vetro basso emissivo, esso è posto sempre come vetro interno dell'infisso, e con la superficie trattata rivolta verso la camera, in modo che rifletta le radiazioni infrarosse provenienti per esempio dai radiatori.

Per quanto riguarda l'utilizzo di vetro stratificato, esso può essere usato sia come vetro esterno che come vetro interno dipendentemente dalle esigenze: ad esempio, se la vetrata deve prevenire uno sfondamento dall'esterno (vetrata antiproiettile) è più utile che il vetro stratificato sia quello esterno, al contrario nelle vetrate di sicurezza ai piani più alti dei palazzi il vetro stratificato sarà quello interno per prevenire urti dall'interno.

Un'altra configurazione che sta prendendo sempre più piede è quella cosiddetta "sfalsata" per la costruzione di vetrate strutturali. In questa configurazione il vetro esterno ha una superficie maggiore di quello interno (e del telaio distanziatore) per far sì che i bordi esterni del primo sporgano, formando delle fasce di vetro che possono interfacciarsi con le strutture di sostegno.

Tutte queste configurazioni possono avere le dimensioni più svariate, in particolare la linea (prodotta dalla Forel S.p.A) in cui verrà integrato il sistema di misura può lavorare vetrate da una superficie minima di 350 mm x 200 mm a una massima di 6000 mm x 3300 mm con spessori da un minimo di 12 mm (unità doppia 3-4-3 composta con due lastre da 3 mm e un telaio largo 4 mm) a un massimo di 100 mm.



*Fig. 1.9: Vetrocamera triplo*



*Fig. 1.10: Vetrocamera triplo sfalsato*



# CAPITOLO 2

## PRODUZIONE DEL VETROCAMERA

Qui di seguito è analizzato l'aspetto della produzione che più è inerente con la presente tesi, ossia l'attuale stato dell'arte per quanto riguarda le tecniche impiegate per riempire i vetrocamera con il gas. Inoltre, per contestualizzare meglio il progetto, è descritta per sommi capi la linea di produzione nella quale lo strumento verrà integrato.

### 1. Tecniche per il riempimento dei pannelli

Il requisito necessario per un riempimento qualitativo è che il moto del gas durante il processo sia il più possibile laminare, questo per ottenere una distribuzione uniforme e una sostituzione completa (o quasi) del volume di aria contenuto nella camera con uno di gas. Se il moto fosse turbolento, infatti, aria e Argon (o qualsiasi altro gas utilizzato) si mescolerebbero, mentre il moto laminare del gas fa sì che questo spinga fuori dalla camera l'aria.

Tralasciando la tecnica per il riempimento manuale, ormai quasi totalmente in disuso, i metodi automatizzati per il riempimento della camera sono due: per iniezione tramite foratura del telaio distanziatore e sfruttando quest'ultimo come convogliatore (nel caso quest'ultimo sia un telaio rigido provvisto di microfori sulla faccia rivolta verso la camera), oppure intrappolando il gas durante il processo di accoppiamento automatico delle lastre.

#### 1.1 Riempimento tramite foratura del telaio distanziatore

Il primo processo, indubbiamente preciso nel controllo della quantità di gas e che ne minimizza lo spreco, è attuato, ad esempio, tramite l'articolo GFC prodotto dall'azienda italiana Forel S.p.A.: esso consiste in una macchina automatica che pratica due fori nel profilo distanziatore per mezzo di un trapano, inserisce nel foro inferiore, praticato sulla sola parete esterna, un iniettore e nell'altro una sonda per la misura della concentrazione di ossigeno residuo, insuffla il gas all'interno del pannello attraverso l'iniettore spingendo l'aria già presente nella camera ad uscire attraverso il foro in cui è posizionata la sonda, e a processo terminato sigilla i due fori.

I principali vantaggi di questo procedimento sono: il pieno controllo della distribuzione di gas nella camera grazie al fatto che viene iniettato e distribuito uniformemente per mezzo del telaio distanziatore, e alla misura della concentrazione per mezzo della sonda; la quasi totale assenza di sprechi di gas nella fase di riempimento, poiché il gas

viene iniettato solo all'interno del pannello e una volta raggiunta la quantità desiderata il flusso si arresta.



*Fig. 2.1: GFC Forel*

Gli svantaggi sono: lentezza del processo che comporta diminuzione della produttività, limitazione intrinseca e non eliminabile dovuta al fatto che il flusso non può superare una certa portata per permettere al gas di avere moto laminare durante la sua insufflazione, caratteristica necessaria, oltre per il motivo già spiegato, anche per garantire un corretto funzionamento del sensore; limiti di applicazione alle sole lastre di vetrocamera che utilizzano i telai rigidi in alluminio o acciaio, mentre ormai una considerevole parte della produzione del vetrocamera si è orientata verso l'utilizzo dei telai flessibili; costi maggiori dovuti all'acquisto di due macchinari, uno per l'accoppiamento e uno per caricare il gas.

L'unico svantaggio eliminabile, o quanto meno riducibile, è la diminuzione della produttività grazie all'utilizzo di una macchina, come il sopracitato GFC, dotata di un polmone aggiuntivo per il caricamento sequenziale di più lastre, le quali possono essere riempite contemporaneamente. Questo aumenta però considerevolmente i costi soprattutto per via della presenza di molteplici meccanismi per l'iniezione contemporanea, e comunque il tempo richiesto per la produzione di un'unità resta elevato.

## 1.2 Riempimento durante la pressatura

L'integrazione del sistema di riempimento nell'accoppiatore è indubbiamente la soluzione ormai più diffusa e utilizzata. La tecnica adottata dalle maggiori ditte produttrici, come ad esempio la già citata Forel e l'austriaca Lisec, è quella di lasciare una fessura di qualche millimetro tra la lastra di vetro e il telaio distanziatore durante la fase di accoppiamento, insufflare il gas tramite un collettore posto sotto alle lastre e infine completare l'accoppiamento. Il controllo della quantità di gas da erogare è ottenuto variando la durata dell'insufflazione, calcolato sulla base della conoscenza della portata di gas (costante) e delle dimensioni delle lastre (variabili ma note).



*Fig. 2.2: Accoppiatore pressa a piani con riempimento gas Forel*

È evidente che tale processo è molto più veloce di quello descritto in precedenza, in quanto il moto del gas può essere mantenuto laminare anche con una portata maggiore dato che il collettore copre tutto il lato inferiore del pannello e la sua sezione è di dimensioni maggiori di quella del profilo distanziatore. Questo, unitamente al fatto che il processo avviene contemporaneamente all'accoppiamento delle lastre, comporta un diminuzione del tempo richiesto per unità e un aumento della produttività. Inoltre vi è un notevole risparmio economico e di spazio nell'acquisto di un solo macchinario, anche se più complesso e costoso di un semplice accoppiatore, piuttosto che due.

Questa tecnica non è però esente da inconvenienti: in primis bisogna sottolineare che per ottenere la concentrazione di gas sufficiente si è costretti a erogare un volume di gas pari a circa una volta e mezza il volume effettivo della camera, valore stimato em-



lastra, e su tutta l'altezza del lato aperto viene misurata la concentrazione di ossigeno residuo tramite vari sensori elettrochimici posti ad intervalli regolari. Tale procedimento presenta però due difetti: il primo è la scarsa accuratezza di misura e la poca affidabilità di tali dati, dovuta alla distribuzione non ottimale del gas causata dal moto turbolento ottenuto insufflando il gas da un solo angolo; il secondo è la difficoltà di flettere lastre di grosso spessore, oltre alla pericolosità e il rischio di rotture che comporta la flessione stessa. Per questi motivi questa soluzione non è tra le più diffuse.

## **2. La linea di produzione**

Per l'obiettivo finale della progetto e per le premesse fatte finora, la linea su cui verrà integrato è ovviamente dotata di un accoppiatore/presa con riempimento gas. Questo per avere la più alta velocità di produzione e per la versatilità nell'utilizzo di tutti i tipi di materie prime. E' prodotta dalla già citata Forel S.p.A., ditta italiana specializzata nella costruzione di attrezzature e macchinari per la produzione del vetrocamera che ha contribuito alla realizzazione di questo progetto mettendo a disposizione una linea su cui fare i test e i materiali per la realizzazione del sistema.

La linea è costituita da vari macchinari che processano il pannello e i suoi componenti, i quali vengono trasportati da una stazione all'altra per mezzo di convogliatori, che fungono anche da stazioni di polmonazione per livellare i diversi tempi di esecuzione dei vari processi facendo stazionare i pannelli in attesa. Il vetro transita su questi macchinari e convogliatori inclinato di sei gradi rispetto al piano verticale, in modo da consentire un notevole risparmio di spazio rispetto alle linee orizzontali. Per poter fare ciò la lastra è appoggiata col bordo su traini motorizzati composti da cinghie oppure da una serie di rulli di gomma, e con una delle due facce su un piano inclinato di sei gradi rispetto al piano verticale. Inoltre, per semplificare la descrizione, d'ora in avanti si supporrà che, ponendosi di fronte alla linea, questa avrà la zona di carico delle lastre di vetro a sinistra e quella di scarico per i pannelli finiti a destra, facendo transitare quindi il vetro da sinistra a destra.

La linea è totalmente automatizzata in tutti i processi, tranne per quanto riguarda la lavorazione e la preparazione dei distanziatori rigidi, che per loro natura non possono essere integrati nella linea.

Le sue caratteristiche tecnologiche sono:

- Possibilità di lavorare tutte le tipologie di materie prime e configurazioni viste in precedenza.
- Vetro minimo processabile:  $L = 350 \text{ mm} \times H = 200 \text{ mm} \times T = 12 \text{ mm}$
- Vetro massimo processabile:  $L = 6000 \text{ mm} \times H = 3200 \text{ mm} \times T = 100 \text{ mm}$

- Produttività: un pannello ogni 30 secondi (dato riferito a un pannello standard, cioè vetrocamera doppio di dimensioni  $L = 1000 \text{ mm} \times H = 500 \text{ mm} \times T = 12 \text{ mm}$ . Ovviamente varia in base alle dimensioni della vetrata diminuendo leggermente per vetri più piccoli e aumentando molto per vetrate più grandi, dato che per motivi di sicurezza quando si processano lastre di grandi dimensioni la velocità di transito è diminuita automaticamente).



*Fig. 2.4: Esempio di linea produttiva per vetrocamera con transito del vetro da sinistra a destra*

La linea è composta dai seguenti macchinari:

- Sbordatrice periferica per la rimozione del rivestimento superficiale lungo il perimetro delle lastre di vetro basso-emissivo. Questa macchina è necessaria nel caso si utilizzino vetrate basso-emissive per rimuovere il rivestimento di argento e ossidi di metallo, da cui gli adesivi del telaio distanziatore a lungo andare possono staccarsi, mentre ciò non accade se sono a contatto con il vetro. Nel caso venga utilizzato qualsiasi altro tipo di vetro questa postazione viene saltata e il vetro viene caricato direttamente sul convogliatore tra questa macchina e la successiva.
- Lavatrice verticale per la pulizia accurata delle lastre di vetro attraverso le fasi di lavaggio e asciugatura.
- Applicatore automatico di distanziatori flessibili per la svolgitura del distanziatore dalla bobina e la sua posa sul vetro. Nel caso vengano utilizzati telai rigidi questa macchina viene bypassata e funge da convogliatore.
- Convogliatore con barre di riferimento per la posa del telaio distanziatore. Questa non è una vera e propria macchina ma un convogliatore a cui l'operatore può accedere per posizionare il telaio nel caso questo sia rigido. Questo tipo di telaio deve essere lavorato e preparato con macchinari esterni alla linea, e poi posato dall'operatore che si aiuta con delle barre di riferimento per l'allineamento e con del-

le pinze pneumatiche per la manipolazione di telai di grandi dimensioni. Come sopra, se vengono utilizzati telai flessibili questa stazione costituisce un semplice convogliatore.

- Accoppiatore/presa a piani con riempimento gas, che verrà descritta in dettaglio più avanti.
- Sigillatrice automatica per l'estrusione del sigillante lungo tutto il bordo del vetrocamera.

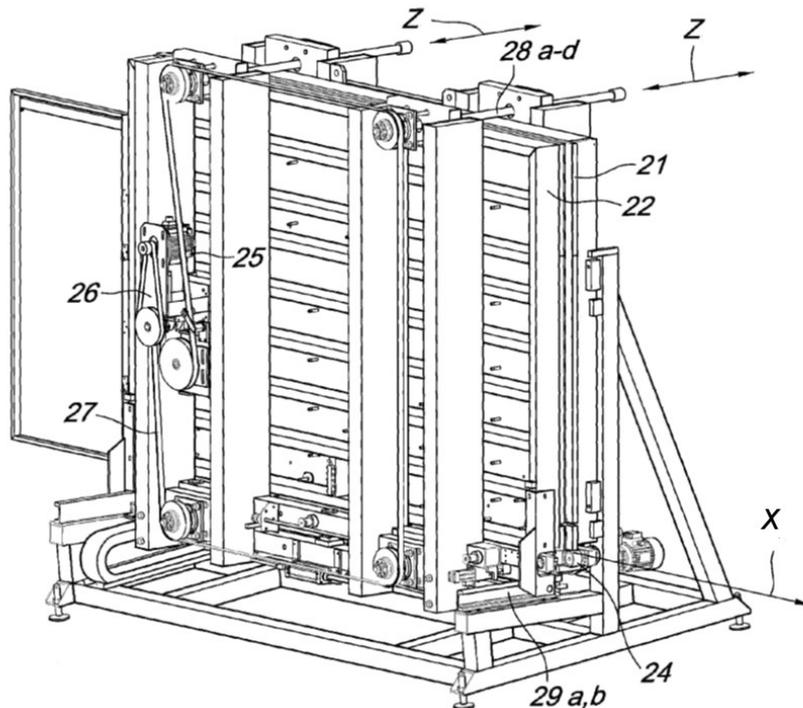
La zona della linea in cui verrà posto il sistema di analisi dovrà essere ovviamente a valle dell'accoppiatore, ma a monte della sigillatrice, questo per evitare di sprecare innanzitutto sigillante su un pannello che è da scartare, ma soprattutto per poter avere la possibilità di recuperare le lastre di vetro, perché se sono incollate al distanziatore dai soli adesivi è ancora possibile rimuoverle senza danneggiarle, mentre dopo la sigillatura esterna questa operazione è impossibile. La situazione attuale prevede che i controlli a campione siano effettuati sul convogliatore in uscita all'accoppiatore durante l'intervallo di tempo in cui il pannello staziona in attesa che la sigillatrice finisca di lavorare il pannello precedente proprio per questo motivo, quindi la scelta migliore sarà integrare il sistema su questo convogliatore.

### **3. L'accoppiatore/presa APG Forel**

Per rendere più semplice la seguente descrizione, si assume come sistema di riferimento per gli assi cartesiani quello della macchina, nel quale l'asse x è costituito dalla direzione di scorrimento di lastre e pannelli e con verso concorde a quello del loro movimento (da sinistra a destra), l'asse z è l'asse perpendicolare al piano su cui giacciono le lastre e ha verso uscente da tale piano (con l'osservatore posizionato davanti alla macchina), e infine l'asse y è l'asse inclinato di sei gradi rispetto alla verticale che giace sul piano su cui poggiano le facce delle lastre, e ha verso positivo dal basso verso l'alto.

L'APG (sigla che sta per Accoppiatore Pressa con riempimento di Gas) è costituito da un basamento vincolato a terra che funge da telaio, al quale sono fissati a loro volta due piani pressanti, quello posteriore fisso e solidale al telaio, quello anteriore invece mobile. Entrambi i piani sono costituiti da intelaiature metalliche la cui faccia a contatto con il vetro è rivestita di un pannello di legno ricoperto di linoleum, in modo tale da favorire lo scivolamento delle lastre sui piani e da offrire una superficie della durezza sufficiente per trasmettere la pressione durante la pressatura ma non abbastanza da rompere il vetro prima di deformarsi elasticamente. Hanno una gamma di dimensioni diver-

se tra le quali i clienti possono scegliere in base alla grandezza delle vetrate massime che vogliono poter lavorare, ma nel nostro caso la dimensione dei piani sarà quella massima per avere la gamma di configurazioni più vasta possibile.

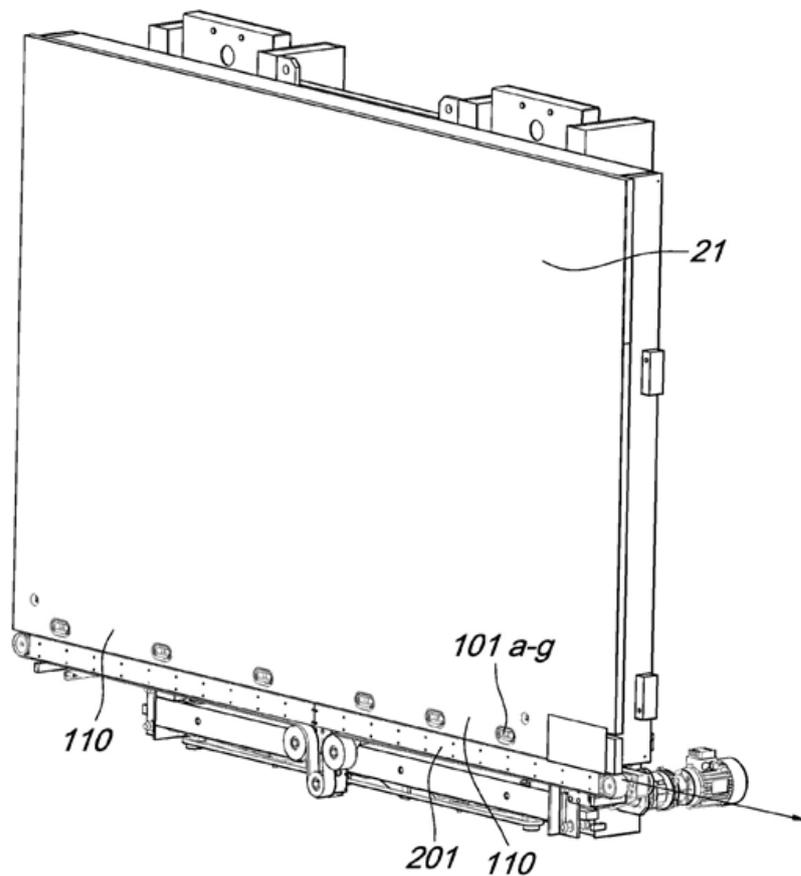


*Fig. 2.5: Disegno dell'APG completo tratto dal brevetto num. EP 2 093 370 A2, intestato a Forel Base, come tutti i seguenti. Si notino gli assi x e z, i due piani pressanti (21 e 22) e il meccanismo per muovere il piano anteriore costituito dalle viti (28a-d), dalla cinghia (27) e dalla motorizzazione (25 e 26).*

Come anticipato prima, il piano anteriore ha un grado di libertà rispetto al telaio: esso scorre lungo l'asse z su delle guide grazie a slitte a ricircolo di sfere, ed è movimentato lungo queste guide da quattro viti a ricircolo di sfere montate in prossimità dei quattro angoli del piano. Il movimento delle quattro viti è reso sincrono meccanicamente con l'utilizzo di un'unica cinghia che muove tutte e quattro le pulegge calettate sulle viti. E' facile intuire che è questo l'asse che esegue l'assemblaggio e la pressatura, infatti le viti sono poste in posizioni adeguate per rendere la pressione esercitata il più uniforme possibile. Questo piano, inoltre, è provvisto di una schiera di ventose distribuite su tutta la sua superficie che gli permettono di catturare e sostenere il vetro, oltre a mantenerlo piano durante le operazioni.

Il piano posteriore è dotato anch'esso di ventose ma in minor numero e solo nella parte inferiore, dato che non hanno il compito di sostenere il vetro, che appoggia già per gravità sul piano. Queste ventose, a differenza di quelle del piano mobile, sono montate su cilindri pneumatici che le portano a contatto col vetro e, una volta effettuato il vuoto, 22

le ritirano portando con se il lembo inferiore della lastra e lo premono contro il piano. Tutto ciò serve per raddrizzare e mantenere dritto questo lembo nel caso le lastre siano storte (cosa che si verifica di frequente, soprattutto quando si lavorano vetri che hanno subito trattamenti termici come la tempratura o la stratificazione), e questo è necessario per garantire la presenza di una fessura di due millimetri per l'insufflazione del gas. Quando il vetrocamera è stato pressato ed è pronto ad uscire dalla macchina, viene disattivato il vuoto delle ventose e queste si ritirano sotto al livello del piano per non ostacolare lo scorrimento del pannello. Per favorirne invece il movimento, su tutta la superficie dei due piani sono distribuiti degli ugelli che soffiano un cuscino d'aria per assicurare che il vetro non resti aderente ai piani, cosa che succede quando, durante la pressatura, si crea l'effetto ventosa tra le lastre e i panni di linoleum.



*Fig. 2.6: Disegno del piano posteriore. Si notino le ventose raddrizza-vetro (101 a-g) e il traino (201).*

Per sostenere il peso delle vetrature e spostarle lungo l'asse x l'APG è dotato di un traino a cinghia posto sotto al piano posteriore. Tale traino è inoltre mobile lungo l'asse y, per essere regolato in altezza nel caso si debbano processare vetrature sfalsate strutturali, e lungo l'asse z, per regolarne la posizione in base allo spessore delle lastre e del pannello completo da sostenere.

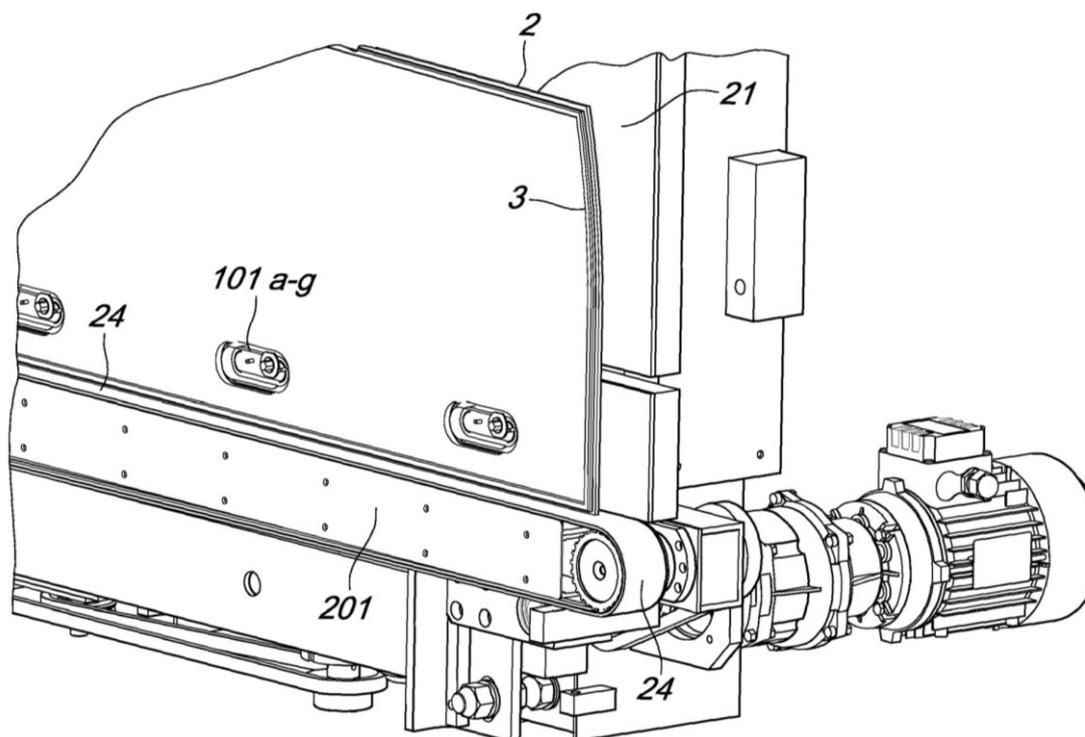
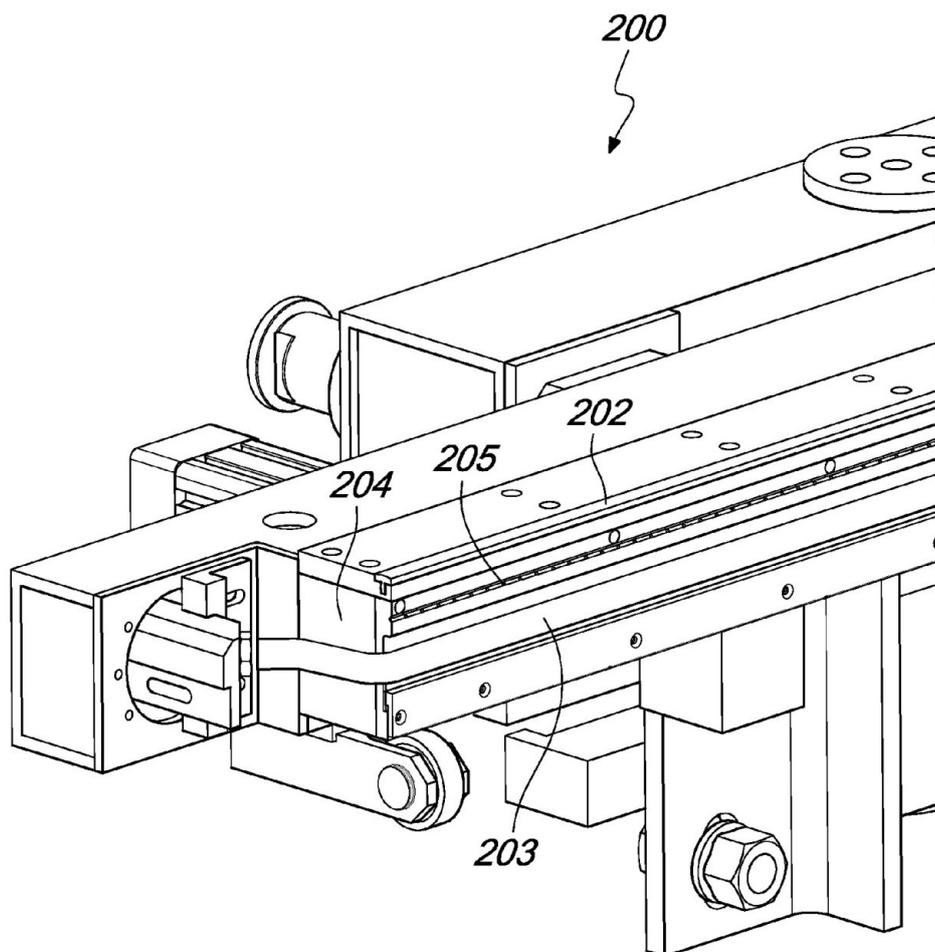


Fig. 2.7: Particolare del traino, sulla cui cinghia (24) è poggiato un pannello (2).

Sotto al piano mobile, infine, si trovano il sostegno anteriore e il collettore per la distribuzione e l'insufflazione del gas. Il sostegno, come si intuisce dal nome, è costituito da una struttura metallica con una superficie ricoperta di polietilene, il cui scopo è fornire un appoggio di sicurezza sotto la lastra, il cui peso è già sostenuto dalle ventose del piano anteriore; questo per prevenire eventuali scivolamenti di tale lastra che porterebbero a problemi di allineamento tra i due vetri durante la fase di pressatura. Il sostegno è mobile sugli assi z e y per posizionarsi e appoggiarsi con precisione sotto al bordo inferiore del vetro senza sporgere al di fuori del suo spessore. Nella versione dell'accoppiatore senza sistema di riempimento questa è la sua unica funzione, mentre con il riempimento è anche il supporto su cui è installato il collettore. Esso è costituito da un serie di camere in alluminio provviste di una schiera di microfori. Le camere sono multiple in modo da poter scegliere quante attivarne in base alla lunghezza del pannello da riempire: una volta appresa la lunghezza delle lastre da processare, il software della macchina apre, per mezzo di elettrovalvole, tutte le camere necessarie a coprire l'intero lato inferiore, lasciando chiuse le altre per evitare inutili sprechi di gas.



*Fig. 2.8: Particolare del sostegno anteriore, nel quale si vedono: il collettore (204), la guarnizione a "T" inserita nel polietilene (202), la guarnizione gonfiabile (203) e la schiera di microfori per il soffio di gas (205).*

Per evitare ulteriori dispersioni il collettore è provvisto di varie tenute: una, costituita da un profilo in gomma con sezione a T, è montata sulla faccia ricoperta di polietilene del sostegno e va a contatto con il bordo inferiore della lastra; un'altra si trova al di sotto della linea dei microfori ed è costituita da un profilo in gomma con sezione cilindrica cavo all'interno che viene gonfiato d'aria al momento dell'insufflazione del gas, questo per fare in modo che occupi lo spazio tra collettore e traino; una terza guarnizione è formata da un piatto di alluminio ricoperto di spugna montato sul fianco destro del piano posteriore (corrispondente in questo caso al lato di uscita del pannello dalla macchina); questo piatto è mosso lungo l'asse z tramite cilindri per posizionarlo a copertura dello spazio tra piano posteriore e anteriore durante il riempimento, e poi ritrarlo quando il pannello deve proseguire lungo la linea; un'ultima tenuta viene montata solo nel caso di riempimento con Krypton o altri gas costosi: un pannello comprimibile in polimero espanso a celle chiuse che scorre tra i due piani fino a premersi contro il bordo

sinistro delle lastre. L'unico lato che rimane aperto è quello superiore, che ai fini del processo di riempimento serve da sfiato per l'aria.

Il processo di accoppiamento è il seguente: in primo luogo il traino si posiziona sull'asse y alla stessa altezza del convogliatore che precede l'accoppiatore, e sull'asse z in modo tale che la cinghia sporga dalla superficie del piano posteriore tanto quanto è lo spessore della lastra da trainare (maggiorato di un margine di sicurezza di 5 millimetri per prevenire cadute di lastre particolarmente storte). La lastra passa dal convogliatore al traino, il quale ne allinea il bordo destro in corrispondenza del bordo destro del piano posteriore. Il piano mobile si chiude premendo la lastra contro il piano fisso per raddrizzarla e la cattura tramite le ventose. Il sostegno anteriore si appoggia al bordo inferiore della lastra allineando sull'asse z il collettore alla faccia del vetro rivolta verso il piano fisso, dopo di che piano e sostegno si allontanano assieme creando lo spazio per il secondo vetro, provvisto di telaio distanziatore. Il traino lo posiziona come il precedente (eventualmente abbassandosi sull'asse verticale nel caso si debba creare un pannello sfalsato), le ventose del piano fisso vi si appoggiano, ne catturano il lembo inferiore e lo tirano con forza contro al piano, raddrizzandolo lungo l'asse x. A questo punto il piano mobile si chiude fino a che il vetro che sta sostenendo con le ventose non è a 2 millimetri dal telaio distanziatore. Tutte i sistemi di tenuta vengono attivati e si procede all'immissione del gas: in base alle dimensioni dei componenti viene calcolato il volume della camera e, di conseguenza, l'equivalente volume di gas da insufflare al suo interno, il quale viene controllato tramite un misuratore di portata massico. Finita l'insufflazione il piano mobile chiude la prima lastra sul telaio distanziatore intrappolando così il gas, e il tutto viene pressato con una forza di 30 N/cm in modo da garantire la tenuta meccanica degli adesivi. Infine se necessario il traino si riposiziona all'altezza dei convogliatori e fa uscire il vetrocamera dall'APG depositandolo sul successivo convogliatore.

Come precedentemente accennato (v. par. 2.1.2), per quanto riguarda il processo di riempimento è necessario precisare quanto segue: nonostante i gas utilizzati siano più densi dell'aria (il rapporto tra densità dell'aria e dell'Argon è di 1:1,38, tra aria e Krypton è 1:2,9) e il loro moto durante la fase di riempimento sia mantenuto laminare, non si può tuttavia trascurare il fatto che i gas si mescolino durante il riempimento. Questo fenomeno, unito al fatto che i sistemi di tenuta non possono essere efficaci al punto da garantire che non ci siano dispersioni attraverso di essi, fa sì che il volume di gas necessario a riempire la camera con la concentrazione richiesta non sia equivalente al volume della camera stessa, bensì un po' maggiore. Tramite prove empiriche si è riu-

sciti a stimare che per riempire con una concentrazione di almeno 95% di gas una camera formata da due lastre di un metro di lunghezza per 50 centimetri di altezza e un distanziatore di 12 millimetri di larghezza è necessario erogare un volume di gas pari ad una volta e mezza il volume contenuto da tale camera. Si è inoltre riusciti a stimare che la variazione della larghezza del distanziatore inficia in maniera trascurabile questo valore, essendo una dimensione di almeno un ordine di grandezza inferiore rispetto alle altre due. Al diminuire delle dimensioni delle lastre, invece, il rapporto aumenta (si arriva ad un valore medio di circa 1:2), così come aumenta anche al loro crescere, soprattutto al crescere dell'altezza, raggiungendo il rapporto di 1:2 per lastre alte due metri e lunghe tre. Mancano purtroppo dati sufficienti per stimare il rapporto per pannelli alti oltre i due metri, perché al momento sono prodotti in rari casi, ma la loro domanda sta crescendo, ed inoltre essere sicuri del riempimento nel caso di pannelli così grandi è indispensabile per evitare lo spreco di grandi quantità di materia prima e di tempo necessario per produrli. Tutto ciò fa capire che il riempimento durante l'accoppiamento è un processo difficile da controllare e per questo è richiesto un sistema di controllo della concentrazione di gas affidabile e sistematico.



## CAPITOLO 3

### Analizzatori di concentrazione di gas

Gli strumenti utilizzati per l'analisi della concentrazione di gas nell'ambito del vetrocamera sono divisi in due categorie: invasivi, o distruttivi, e non. Come è facile intuire dalla distinzione stessa, la differenza sostanziale è che i primi comportano il sacrificio dell'integrità del pannello finito per poter effettuare la misurazione (e quindi il controllo è per forza di cose effettuato a campione), i secondi invece no, rendendo il controllo potenzialmente puntuale su ogni singolo pezzo prodotto.

#### 1. Strumenti invasivi

La prima categoria di strumenti è costituita quasi esclusivamente da analizzatori di ossigeno residuo di tipo elettrochimico, dotati di aghi (v. immagine) oppure di sonde per prelevare un campione dell'atmosfera in analisi, nel nostro caso quella contenuta nella camera. Gli strumenti ad ago sono funzionali nel caso di pannelli costruiti con distanziatori flessibili (es. SuperSpacer), i quali sono facilmente penetrabili da tale ago, altrimenti in presenza di telai distanziatori rigidi è necessario forare il telaio con un trapano



*Fig. 3.1: Analizzatore di ossigeno residuo ad ago.*

e poi inserire la sonda. In entrambi i casi il procedimento è il seguente: una volta inserito l'ago o la sonda, una pompa aspira una campione di pochi millilitri dell'atmosfera contenuta nella camera e la convoglia verso una cella elettrochimica. Una volta ottenu-

to il valore della concentrazione di ossigeno residuo, con opportune tabelle di conversione (basate sulla conoscenza del dato che l'aria è composta per il 21% circa di ossigeno e che la concentrazione di gas è complementare a quella dell'aria) si risale alla misura della concentrazione di gas.

### 1.1. Struttura del sensore

Un generico sensore elettrochimico per la rilevazione di gas è costituito da un elettrodo sensibile, detto anche di lavoro, uno di accumulo e uno di riferimento (se necessario), un fluido in cui questi elettrodi sono immersi che funge da elettrolita, ed una membrana igroscopica.

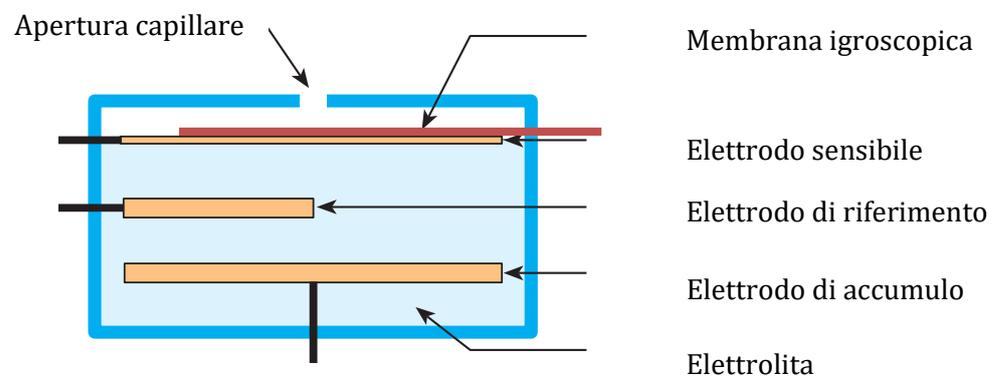


Fig. 3.2: Schema del sensore elettrochimico

Le particelle di gas che entrano in contatto con il sensore prima di tutto devono attraversare un'apertura capillare, la quale ha la funzione di mantenere il loro numero all'interno del sensore basso e costante. Quindi attraversano la membrana igroscopica, che filtra le molecole di acqua in forma di vapore presenti nel campione prelevato e previene la fuoriuscita dell'elettrolita. Una volta a contatto con l'elettrodo sensibile, il gas reagisce con il materiale di cui questo è costituito con una reazione di ossidazione oppure di riduzione (a seconda del materiale e del gas). Se si pone una resistenza tra anodo e catodo si crea una corrente, la cui intensità è direttamente proporzionale alla quantità di gas che è entrata a contatto con l'elettrodo sensibile.

Nella maggior parte dei casi questi sensori per funzionare necessitano dell'applicazione di una differenza di potenziale tra i due elettrodi, che deve rimanere costante. Poiché ovviamente ciò non può essere a causa delle continue reazioni di ossido-riduzione, vicino all'elettrodo di lavoro viene posto quello di riferimento ad una ben determinata tensione. La sua funzione è quella di mantenere costante la differenza di potenziale tra gli elettrodi, e spesso viene connesso all'elettrodo sensibile tramite un ponte esterno alla camera di reazione.

Nel caso del sensore per ossigeno, non è richiesta una tensione esterna né, quindi, un elettrodo di riferimento per mantenerla, ma gli elettroni per la riduzione dell'ossigeno al catodo vengono forniti dall'elettrodo, costituito di piombo o cadmio.

## 1.2. Pregi e difetti degli strumenti invasivi

La misura indiretta della concentrazione del gas tramite l'analisi dell'ossigeno residuo non necessita di tarature specifiche per la misura di elementi diversi, cosa che è invece necessaria per una misura diretta. Dato che nella produzione del vetrocamera vengono utilizzati sia Argon che Krypton o miscele dei due, questo approccio è sicuramente il più versatile, e questo aspetto unito alla semplicità della struttura e dei componenti lo rendono anche il più economico. Tuttavia proprio la misura indiretta ne limita l'accuratezza, perché il dato ottenuto dalla misurazione è affetto non solo dall'incertezza di misura dovuta allo strumento, ma anche dall'errore dovuto al calcolo dell'aria residua nel pannello.

Nello specifico, l'errore di misura della concentrazione di gas ottenuto tramite analisi dell'ossigeno residuo è il seguente:

Posto che la concentrazione di ossigeno rilevata dall'analizzatore elettrochimico è espressa nella forma:

$$\hat{C} = \bar{C} \pm U_C [\%] \quad (4.1)$$

dove  $\hat{C}$  è il risultato della misurazione,  $\bar{C}$  il suo valore numerico e  $U_C$  il valore dell'incertezza estesa dello strumento, dovuta alle sue varie non idealità intrinseche, possiamo dire che la concentrazione di aria residua rilevata all'interno della camera è data dal rapporto:

$$\hat{C}_{camera} : \hat{X} = \hat{C}_{aria} : 100 \quad (4.2)$$

dove  $X$  è la concentrazione di aria residua nel pannello,  $\hat{C}_{camera}$  la concentrazione di ossigeno misurata dallo strumento e  $\hat{C}_{aria}$  quella in aria. Quindi:

$$\hat{X} = \frac{\hat{C}_{camera} \times 100}{\hat{C}_{aria}} [\%] \quad (4.3)$$

E sostituendo la [4.1] nella [4.3] si ottiene:

$$\hat{X} = \frac{(\bar{C}_{camera} \pm U_C) \times 100}{\bar{C}_{aria} \pm U} [\%] \quad (4.4)$$

A questo punto per ottenere la concentrazione di ossigeno le possibilità sono due: o si approssima la concentrazione di ossigeno in aria al suo valore nominale del 20,95% tralasciando di attribuire a tale valore un'incertezza, oppure si effettua una misura dell'atmosfera nella quale è stata ottenuta la camera in analisi, e cioè si rileva la concentrazione di ossigeno in aria attribuendo all'incertezza  $U$  a denominatore nella [4.4] il valore dell'incertezza dello strumento. In formule, per il primo caso è:

$$\hat{X} = \frac{(\bar{C}_{camera} \pm U_C) \times 100}{20,95} = A \times \bar{C}_{camera} \pm U_X [\%] \quad (4.5)$$

dove  $U_X$  è l'incertezza estesa propria della misura di  $X$  ottenuta con questo metodo, ed è pari al valore di  $U_C$  amplificato di un fattore pari ad  $A = 100/20,95 \approx 4,773$ .

Per il secondo caso vale invece:

$$\hat{X} = 100 \times \frac{\bar{C}_{camera} \pm U_C}{\bar{C}_{aria} \pm U_C} [\%] \quad (4.6)$$

Esprimendo la [4.6] in forma estesa si ottiene:

$$\bar{X} \pm U_x = 100 \times \frac{\bar{C}_{camera} \pm U_C}{\bar{C}_{aria} \pm U_C} [\%] \quad (4.7)$$

Dato che l'accuratezza richiesta da questo tipo di applicazione dello strumento non è elevata e l'aumento dell'errore dovuto all'approssimazione è impercettibile (soprattutto per basse concentrazioni di ossigeno come nel caso in questo caso), è prassi comune utilizzare il primo metodo semplificando così il calcolo. Per rendere più chiara la trattazione e valutare la differenza tra i risultati ottenuti dai due procedimenti di calcolo viene riportato un esempio numerico:

Misura ottenuta per mezzo di analizzatore elettrochimico di concentrazione di  $O_2$  ad ago Dansensor Checkpoint su un pannello di vetrocamera riempito con la pressa APG Forel.

Specifiche dello strumento:

- range di misura: 0-100%;
- risoluzione: 0,1%;
- accuratezza di misura di 1% di O<sub>2</sub>: 0,25%

Quantità di O<sub>2</sub> rilevata in aria: (20,8 ± 0,25) %

Quantità di O<sub>2</sub> rilevata nella camera: (0,8 ± 0,25) %

Utilizzando l'espressione (4.5) si ottiene una concentrazione di aria all'interno della camera pari a:

$$X = 4,773 \times 0,8 \pm 4,773 \times 0,25 = (3,818 \pm 1,193) \%$$

Utilizzando invece l'espressione (4.6), il valore centrale che si ottiene è:

$$X = 0,8 \times 100 / 20,8 = 3,85 \%$$

Per ricavare l'errore massimo di questa misurazione analizzo i worst cases possibili:

$$(20,8 + 0,25) \% : 100 \% = (0,8 + 0,25) \% : X_1 \quad \rightarrow \quad X_1 = 4,99 \%$$

$$(20,8 + 0,25) \% : 100 \% = (0,8 - 0,25) \% : X_2 \quad \rightarrow \quad X_2 = 2,61 \%$$

$$(20,8 - 0,25) \% : 100 \% = (0,8 + 0,25) \% : X_3 \quad \rightarrow \quad X_3 = 5,11 \%$$

$$(20,8 - 0,25) \% : 100 \% = (0,8 - 0,25) \% : X_4 \quad \rightarrow \quad X_4 = 2,68 \%$$

Gli estremi dell'intervallo sono X<sub>2</sub> e X<sub>3</sub>, e gli scostamenti dal valore centrale dell'intervallo sono pari a:

$$e_1 = |X - X_2| = 1,23 \%$$

$$e_2 = |X - X_3| = 1,26 \%$$

Possiamo approssimare l'errore medio come:

$$e_m = \frac{(e_1 + e_2)}{2} = 1,25 \%$$

In conclusione, si può notare come utilizzando l'espressione (4.6) l'accuratezza migliori e il valore dell'incertezza estesa di misura sia maggiore, garantendo quindi un risultato più attendibile, tuttavia le differenze tra i risultati ottenuti con questo metodo e quelli ottenuti con quello semplificato sono infinitesimali e poco significative per l'applicazione in oggetto. Le differenze sono più evidenti per valori più elevati di ossigeno, ma non è il nostro caso dato che la precisione richiesta è soprattutto attorno al valore di 1% di ossigeno, corrispondente al 95% di Argon (o altro gas) nella camera, valore che rappresenta come già detto il limite tra un pannello accettabile e uno da scartare.

## 2. Strumenti non invasivi

La seconda categoria di strumenti è costituita da analizzatori che non richiedono il prelievo di un campione dell'ambiente presente all'interno della camera, ma effettuano la misurazione sfruttando altri principi fisici, come ad esempio la spettrometria del gas o l'analisi ottica. Un esempio abbastanza diffuso di questa tipologia di strumento è il GasGlass Handheld prodotto dall'azienda finlandese Sparklike, che ha rappresentato fino a poco tempo fa l'unica alternativa agli strumenti invasivi.



Fig. 3.3: GasGlass Handheld

### 2.1 Struttura del sensore

Lo strumento è composto da un elettrodo che, quando viene effettuata la misurazione, è portato ad una tensione di 50000V, la quale genera una scintilla all'interno della camera che ionizza il gas facendolo emettere luce. Uno spettrometro misura l'intensità di questa radiazione, ed un microprocessore analizza ed elabora il segnale dello spettrometro visualizzando a display la concentrazione misurata.

### 2.2 Pregi e difetti degli strumenti non invasivi

Sebbene il GasGlass Handheld abbia l'enorme vantaggio, rispetto agli analizzatori invasivi, di non danneggiare i pannelli di vetrocamera e rendere così l'analisi realizzabile su ogni pannello prodotto, purtroppo questo strumento presenta dei limiti che non lo rendono utilizzabile in tutte le situazioni. In primo luogo questo strumento misura direttamente la concentrazione di gas all'interno della camera, che è un vantaggio, seppur minimo, in termini di riduzione degli errori dovuti alla misura derivata ottenuta, ad esempio, con gli analizzatori di ossigeno residuo e conseguente aumento

dell'accuratezza, ma presenta un forte svantaggio in quanto richiede una taratura specifica per ogni tipo di gas che si vuole analizzare, e questa taratura è molto costosa e deve essere effettuata dalla casa madre. In altre parole, se una vetreria produce vetro isolante utilizzando sia Argon che Krypton e vuole controllare ogni pannello, deve equipaggiarsi con due strumenti, uno tarato per l'Argon ed uno per il Krypton, aspetto ancor più complicato nel caso di impiego di miscele.



*Fig. 3.4: schema del GasGlass Handheld*

Inoltre, essendo uno strumento che sfrutta una scintilla di elettricità per ionizzare il gas, questa deve attraversare la lastra di vetro su cui lo strumento è appoggiato, e se tale lastra è di tipo basso emissivo oppure stratificato lo strumento è inutilizzabile perché nel primo caso il rivestimento che rende il vetro basso emissivo, essendo metallico, funge da messa a terra per la scintilla, nel secondo perché la pellicola di PVB posta tra le due lastre di vetro funge da isolante. Infine nel caso la vetrata isolante sia composta da due camere sono richieste due misure, una per lato, perché lo strumento può analizzare solo la concentrazione all'interno della camera adiacente alla lastra di vetro su cui è poggiato, e ciò significa anche che se la vetrata è composta da tre o più camere non si può conoscere la concentrazione delle camere più interne (se non distruggendo la vetrata ovviamente).

### 3. L'analizzatore di gas Sparklike Laser

Per l'applicazione in linea oggetto di questa tesi la necessità è stata quella di trovare uno strumento in grado di combinare i vantaggi di entrambe le categorie sopra analizzate: la versatilità di un analizzatore ad ossigeno residuo e la non invasività del GasGlass Handheld. Questi requisiti sono soddisfatti dal GasGlass Laser, analizzatore manuale di ossigeno residuo di tipo ottico prodotto anche questo dalla finlandese Sparklike, già produttrice del GasGlass Handheld. Più precisamente, il GasGlass Laser si basa sulla spettroscopia laser e sulla tecnologia TDLAS ("Tunable Diod Laser Absorption Spectroscopy"), ed è costituito da tre elementi principali: la testa di misura (contenente la sensoristica e la meccanica), il corpo principale (contenente l'hardware e il software per l'analisi dei dati in arrivo dalla testa di misura) e il display per la visualizzazione dei risultati.



*Fig. 3.5: Sparklike Laser*

#### 3.1 Struttura e funzionamento dell'analizzatore

L'analisi spettroscopica quantitativa si basa sostanzialmente sulla legge di Lambert-Beer, una relazione empirica che correla la quantità di luce assorbita da un mezzo alla natura chimica, alla concentrazione ed allo spessore del mezzo attraversato. In particolare, il suo enunciato dice che quando un fascio di luce (monocromatica) di intensi-

tà  $I_0$  attraversa uno strato di spessore  $l$  di un mezzo, una parte di esso viene assorbita dal mezzo stesso e una parte ne viene trasmessa con intensità residua  $I_1$ , e il rapporto tra le intensità della luce trasmessa e quella incidente sul mezzo attraversato è espresso dalla seguente relazione:

$$\frac{I_1}{I_0} = e^{-k_\lambda l} = T = e^{-A} \quad (4.8)$$

dove  $k_\lambda$  è il coefficiente di attenuazione (che è una costante tipica del mezzo attraversato e dipende dalla lunghezza d'onda  $\lambda$  del fascio di luce). Definita quindi la trasmittanza  $T$  come sopra e l'assorbanza  $A$  come l'opposto del logaritmo naturale della trasmittanza, questa legge assume una forma ancor più semplificata:

$$A = k_\lambda l = \varepsilon_\lambda l M \quad (4.9)$$

dove  $\varepsilon_\lambda$  è il coefficiente di assorbimento molare di una data specie chimica ad una data lunghezza d'onda  $\lambda$ , e rappresenta l'assorbanza specifica di una soluzione a concentrazione molare unitaria e attraverso una cella di lunghezza ottica unitaria; mentre  $M$  è la concentrazione molare del mezzo attraversato dalla luce. Confrontando la (4.8) con la (4.9) si ottiene la seguente formulazione:

$$\varepsilon_\lambda l M = \ln \left( \frac{I_0}{I_1} \right) \quad (4.10)$$

da cui è semplice ricavare l'espressione della molarità in funzione degli altri termini:

$$M = \frac{\ln I_0 - \ln I_1}{\varepsilon_\lambda l} \quad (4.11)$$

Va sottolineato che la legge di Lambert-Beer, con riferimento alla formulazione (4.9), è valida solo per soluzioni molto diluite, vale a dire che se la molarità del soluto  $M$  che si cerca di conoscere è bassa esiste proporzionalità tra  $M$  e  $A$ , altrimenti al crescere di  $M$  si verificano deviazioni notevoli dalla proporzionalità con conseguente poca attendibilità del risultato. Nel caso dello Sparklike Laser la molarità su cui si vuole avere la massima attendibilità e precisione è un'intorno dell'1%, per cui questa ipotesi è verificata. Per effettuare un'analisi spettrometrica quantitativa di un gas contenuto all'interno di un recipiente chiuso trasparente (che nel caso specifico riguarda l'ossigeno presente

all'interno del vetrocamera) è necessario irradiare il recipiente con un fascio di luce monocromatico ad una lunghezza d'onda tale per cui si verifichi un assorbimento da parte degli atomi del gas in analisi e rilevare l'intensità del fascio di luce trasmesso, che può essere sia un fascio di luce rifratto che uno riflesso da una delle superfici irradiate. Lo Sparklike Laser utilizza i fasci di luce riflessi per effettuare la spettrometria, in primis per evitare di avere due elementi distinti (la sorgente luminosa e il sensore) da dover appoggiare sulle due facce esterne contrapposte del vetrocamera e da dover allineare tra loro (cosa non così semplice se si pensa ad esempio a controlli da effettuare sulle vetrate di grattacieli o palazzi), ma soprattutto per aumentare l'accuratezza di misura evitando problemi di perdite di intensità non perfettamente note dovute a:

- conoscenza incerta della quantità di impurità di O<sub>2</sub> nelle lastre di vetro, per la quale varia il coefficiente di attenuazione  $k_\lambda$
- impossibilità di garantire che il fascio luminoso sia totalmente rifratto, situazione che si verificherebbe solo se il raggio laser fosse perfettamente perpendicolare alla lastra di vetro oppure incidesse con un angolo corrispondente esattamente all'angolo di Brewster<sup>1</sup>, impossibile da realizzare perché le lastre di vetro non sono mai perfettamente piane
- conoscenza imprecisa della lunghezza del cammino ottico del fascio luminoso, sia a causa della misura approssimativa dei reali spessori di lastre e intercapedine nell'esatto punto di incidenza del laser, che per l'altrettanto approssimativo dato riguardo l'indice di rifrazione del vetro.

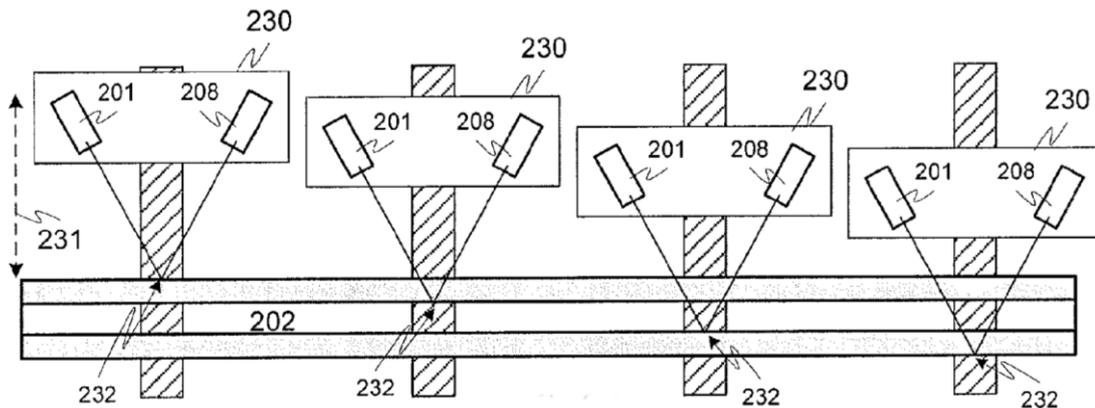
Sfruttando invece la componente riflessa del laser lo strumento effettua due misurazioni: misura con precisione le reali dimensioni dei componenti del pannello e quantifica la concentrazione di gas.

La prima misurazione viene effettuata grazie ad un sistema che muove avanti e indietro la sorgente luminosa ed il sensore all'interno della testa: questi due sono tra loro fissi e inclinati di un certo angolo (v. fig. 4.5), e montati su un sistema vite-madrevite azionato da un motore brushless che consente loro di muoversi perpendicolarmente al pannello. Nella configurazione di partenza questo sistema è completamente arretrato, e quando viene avviata la misurazione il motore sposta verso il pannello il laser e il fo-

---

<sup>1</sup> Angolo per cui si verifica il fenomeno di rifrazione totale. Dipende dai coefficienti di rifrazione  $n_1$  ed  $n_2$  dei due materiali attraversati dal fascio luminoso secondo la relazione  $\theta = \arctan\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$ . Peraltro il coefficiente di rifrazione del vetro non è costante ma varia in base alla composizione chimica e ai trattamenti che subisce.

todiolo. Dato che l'angolo tra questi due è fisso, ci sarà una sola posizione per ogni superficie del pannello per la quale il raggio riflesso colpisca completamente il fotodiolo, dando quindi il segnale d'intensità massima, e questa posizione viene rilevata dall'encoder del motore brushless. Dalle differenze tra queste posizioni si ricavano gli spessori delle lastre, delle eventuali pellicole di PVB e dei distanziatori, ottenendo quindi il cammino ottico del raggio laser con accuratezza centesimale.



*Fig. 3.6: Immagine, tratta dal brevetto US 2014092379A1 intestato a Sparklike, schematica della disposizione della sorgente luminosa 201 e del sensore 208 all'interno della testa 230. Si notino le differenti distanze dal pannello (231) per ogni superficie rilevata dalla riflessione del raggio laser (232).*

Il movimento del laser e del sensore è importante anche per l'analisi spettrometrica, infatti, essendo rilevate tutte le intensità dei raggi riflessi da ciascuna superficie, sono note le perdite di intensità non imputabili alla concentrazione di gas, ottenendo così l'offset per la misura. In particolare, facendo riferimento ad un vetro con singola camera come quello in fig. 4.5, dal confronto dell'intensità del raggio riflesso dalla faccia 3 (3<sup>a</sup> immagine da sinistra) con quelle di tutti gli altri si ricava l'assorbimento netto del gas, da cui si ottiene poi la concentrazione molare come visto sopra.

Per rilevare il picco d'intensità minima (cioè la massima assorbimento) del raggio riflesso lo Sparklike Laser varia la lunghezza d'onda della sorgente luminosa in un intorno di una linea di assorbimento propria dell'ossigeno. Per fare ciò utilizza la tecnica che nel campo della tecnologia TDLAS è nota come WMS (Wavelength Modulation Spectroscopy), cioè la corrente che alimenta il laser viene fatta variare sinusoidalmente da un generatore di funzioni. La linea d'assorbimento scelta è quella più vicina al violetto possibile in modo da avere una lunghezza d'onda del raggio laser bassa e di conseguenza una frequenza elevata, questo per diminuire il rumore dovuto ai componenti del sistema, dato che la sua ampiezza ha un andamento inversamente proporzionale alla frequenza a cui si lavora. Un esempio dell'andamento dell'intensità del raggio riflesso e della trasmittanza in funzione della lunghezza d'onda sono mostrati in fig. 4.6 e 4.7. Si

noti che le variazioni sono lievi, quindi diminuire il più possibile le incertezze dovute ai fattori esterni e al rumore è indispensabile. È per questo motivo che il vano dove si trovano la sorgente laser e il fotodiodo è riempito con un gas di purga, solitamente per

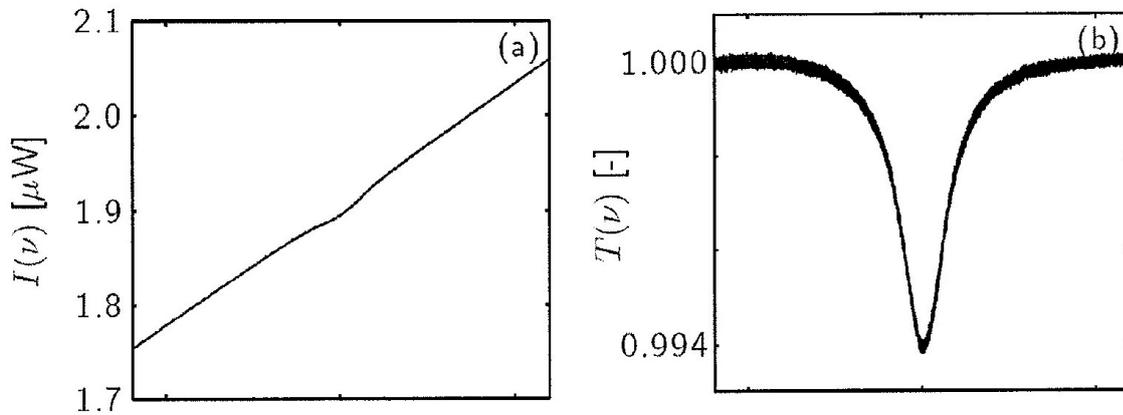


Fig. 3.7: esempio di andamenti di intensità (a) e trasmittanza (b) in funzione della lunghezza d'onda.

praticità e semplicità di reperimento Argon.

Il raggio riflesso colpisce un fotodiodo, il quale trasforma l'intensità luminosa in un segnale in tensione, che viene filtrato attraverso un filtro passa-alto ed amplificato, e successivamente elaborato per estrapolare il valore numerico della concentrazione.

Come si vede nella figura 3.5 la testa di misura è dotata di maniglie per essere afferrata e sostenuta durante la misurazione, essendo questo uno strumento nato per essere manuale. Una volta appoggiata su una delle due facce del pannello in analisi, tramite un pulsante (visibile in figura 3.8) si attiva una pompa che aspira l'aria all'interno della ventosa, in modo da farla aderire perfettamente e eliminare tutta l'aria presente tra le superfici di contatto tra strumento e pannello. Verificata la presenza del vuoto lo strumento procede a scansionare il vetro secondo il procedimento illustrato sopra, ed infine restituisce a display tutte le dimensioni del pannello e la concentrazione di gas nella camera (o nelle camere).

### 3.2 Pregi e difetti

Riassumendo brevemente quanto già anticipato prima, questo strumento incorpora i principali vantaggi degli strumenti invasivi e di quelli non invasivi, potendo analizzare pressoché qualsiasi tipo di vetro e composizione di vetrocamera attualmente utilizzati e non richiede la distruzione del pannello.

Il principale difetto per l'utilizzo nelle vetrerie è la scomodità di dover effettuare il controllo manualmente e maneggiare uno strumento delicato e allo stesso tempo pesante

ed ingombrante (le dimensioni dello strumento verranno analizzate nel prossimo capitolo per l'applicazione in linea). Ecco quindi la necessità dell'applicazione oggetto di questa tesi.



*Fig. 3.8: vista frontale della testa di misura. Si noti la ventosa attorno al pannello di vetro centrale.*



# CAPITOLO 4

## INTEGRAZIONE DELLO STRUMENTO IN LINEA

Nei prossimi paragrafi viene descritta la progettazione, le caratteristiche tecniche e la realizzazione del progetto, ed infine sono presentati i risultati delle prove effettuate e da questi tratte le conclusioni.

### 1. Progettazione del sistema

Il punto di partenza del progetto è la scelta del collocamento dello strumento lungo la linea. Come già visto nel capitolo 3 e facendo riferimento alla linea ivi descritta, la scelta migliore sarebbe quella di integrare lo strumento all'interno dell'APG e misurare la concentrazione continuamente durante la fase di riempimento, ma tutto ciò non è possibile per problemi di spazi, ingombri e tempi ciclo. La scelta ricade quindi sul posizionamento del sistema a bordo del convogliatore a valle dell'APG.

I requisiti richiesti al sistema sono i seguenti:

- poter muovere la testa dello strumento in profondità con una escursione tale da poter analizzare pannelli di spessore totale variabile da 12 a 100 mm;
- poter muovere la testa dello strumento lungo l'asse verticale con una escursione tale da poter analizzare pannelli alti fino a 3300 mm;
- effettuare la misurazione in maniera sufficientemente rapida da non aumentare il tempo ciclo richiesto per la produzione di un pannello, che è di 30 secondi per le singole camere, mentre per le doppie camere è di un minuto circa.

E' implicita inoltre la richiesta che il sistema venga realizzato al minor costo possibile, essendo questa una applicazione da commercializzare ed essendo già il solo strumento molto costoso.

Per realizzare un processo che soddisfi queste specifiche, in particolar modo la richiesta di effettuare il controllo in un tempo limite di 30 secondi che è la più restrittiva, è stato dapprima studiato il comportamento della concentrazione di gas all'interno dei pannelli appena accoppiati, il quale è risultato sempre il medesimo per tutte le dimensioni di vetri e distanziatori utilizzati: la concentrazione risulta sempre molto elevata (tra il 97 e il 99%) nella parte inferiore del pannello, com'è ovvio aspettarsi, ed in particolare, facendo riferimento all'orientamento della linea descritta nel capitolo 2, il massimo si ha in corrispondenza dell'angolo in basso a destra, in cui si combinano gli effetti delle tenute inferiore e laterale; è più bassa invece nella parte superiore, con valori che oscil-

lano tra l'85% e il 95%, e il minimo si trova sempre in corrispondenza dell'angolo superiore sinistro, dove non c'è alcuna tenuta di contenimento.

Tutti i pannelli su cui sono stati rilevati questi dati sono stati poi controllati con un analizzatore di ossigeno residuo di tipo elettrochimico Dansensor Checkpoint, secondo la procedura descritta nella normativa UNI EN 1279-6, la quale prevede che le misurazioni, per essere ritenute un'effettiva sintesi dell'atmosfera contenuta nella camera, debbano essere effettuate a distanza di 24 ore dal completamento del pannello in modo che il gas sia distribuito uniformemente. Sono stati considerati validi i dati raccolti per i pannelli che risultassero avere una concentrazione pari o superiore al 95%.

Sulla base di questa analisi si è deciso di effettuare la misurazione in corrispondenza dell'angolo superiore sinistro dei pannelli, e che il valore minimo da rilevare localmente per considerare un vetro riempito a sufficienza sia di 92%. In caso di vetrocamere risultanti conformi il valore della concentrazione rilevata viene visualizzato sul monitor del PC del GasGlass Laser e la produzione prosegue normalmente, altrimenti la consolle dell'APG avvisa tramite un segnale acustico l'anomalia all'operatore, il quale potrà scegliere, sulla base del valore visualizzato a monitor, se arrestare la produzione per scaricare il pannello semilavorato da scartare prima che venga sigillato, oppure lasciarne terminare l'esecuzione ed eliminarlo o riempirlo ulteriormente in seguito manualmente, ove possibile.

## **2. Adeguamento dello strumento**

Per poter integrare lo strumento in linea sono stati apportati degli adeguamenti alla versione manuale del Laser, con la collaborazione di Sparklike.

In primo luogo la testa è stata alleggerita rimuovendo le coperture in plastica e le maniglie, ed inoltre è stata creata una flangia frontale in alluminio simile all'esistente (cioè con la finestra per il passaggio del laser e le sedi per le guarnizioni) con l'aggiunta dei fori per il fissaggio della testa al supporto che la collega ai cinematismi di posizionamento ed anche dei fori per l'alimentazione di Argon del vano interno .

La modifica più sostanziale è stata la rimozione della gommatura dalla flangia frontale, che le permetteva di aderire al pannello di vetro e di fare il vuoto, e sostituirla con una spugna a celle chiuse dotata di una cavità centrale in corrispondenza della finestra della flangia, cavità da riempire di Argon al momento della misura.

Infine sono state apportate delle modifiche al software dello strumento per permettergli di ricevere come input gli spessori del pannello e dei componenti, in modo da ridurre il tempo richiesto per una misura a 8 secondi per pannelli a singola camera, rispetto ai 25 che richiede la versione manuale (tempo dovuto alla scansione completa della pro-

fondità del pannello), e 18 per le doppie camere, e di inviare il risultato della misura al PC che gestisce l'APG.

### 3. Movimento orizzontale

Per poter soddisfare la prima richiesta del precedente elenco la testa di misura è montata su un carrello che scorre su una coppia di guide a ricircolazione di sfere, accoppiato ad un attuatore pneumatico di corsa adeguata che lo muova. La scelta è ricaduta su un sistema pneumatico perché non è richiesta alcuna precisione di posizionamento, dato che, anche se gli spessori dei pannelli sono variabili, la testa di misura deve essere sempre mantenuta premuta contro il vetro; per svolgere questo compito non è richiesta una forza elevata, anzi, lo strumento deve essere appoggiato con una certa delicatezza contro il pannello per evitare danni ad entrambi. Il cilindro è azionato da una elettrovalvola monostabile, in modo che solo se l'elettrovalvola è eccitata (cioè riceve un segnale dal PLC) il cilindro effettua l'escursione, altrimenti la testa di misura è sempre in posizione arretrata. La pressione di esercizio del cilindro è regolata solo per l'uscita dello stelo, in modo da poter tarare la forza con cui la testa dello strumento preme contro il vetro, mentre per il rientro è lasciata alla pressione di rete per evitare strozzature e conseguenti rallentamenti. La velocità di uscita dello stelo è modulata regolando il flusso di ritorno dal cilindro all'elettrovalvola. Per il controllo del ciclo il cilindro è inoltre dotato di un sensore magnetico che rileva quando lo stelo è in posizione completamente arretrata, e questo segnale dà il consenso alla linea per poter far avanzare il pannello lungo il convogliatore. La testa è fatta scorrere su una guida perché il peso non gravi sullo stelo del cilindro, creando un momento flettente che porterebbe a prematura usura le bronzine del cilindro pneumatico.

Le caratteristiche dei componenti utilizzati sono elencate qui di seguito:

#### GUIDE/CARRELLI:

- Costruttore e modello: unità a ricircolazione a quattro ranghi di sfere KWVE15 INA/FAG;
- Capacità di carico statico: 14500 N;
- Capacità di carico dinamico: 7200 N.

#### ATTUATORE PNEUMATICO:

- Costruttore e modello: cilindro ISO (standard ISO 6432) doppio effetto a stelo semplice CD85N16-110B di



## SMC

- Alesaggio e corsa:  $\varnothing$  16 mm, S = 110 mm
- Forza teorica: 120,6 N ad una pressione d'esercizio di 6 bar (pressione d'esercizio delle linee Forel);
- Anello magnetico integrato allo stelo, montaggio sensore a fascetta.

### ELETTROVALVOLA:

- Costruttore e modello: elettrovalvola monostabile SY5120-5D-01F2-Q di SMC;
- Caratteristiche elettriche: alimentazione a 24 V DC, consumo elettrico di 0.4 W;
- Tempo di risposta: minore di 19 ms;
- Campo pressione d'esercizio: da 1.5 bar a 7 bar;
- Caratteristiche di portata:  $C = 1.9 \text{ dm}^3/(\text{s}\cdot\text{bar})$ ,  
 $Q = 648 \text{ normal-litri/min}$ ;



### SENSORE:

- Costruttore e modello: sensore magnetico allo stato solido tipo NPN D-M9N di SMC;
- Tensione di alimentazione: 5, 12 o 24 V DC;
- Assorbimento: minore di 10 mA;
- Caduta interna di tensione: minore di 0.8 V;
- Corrente di dispersione: minore di 100  $\mu\text{A}$  a 24 V DC;



### REGOLATORE DI PRESSIONE:

- Costruttore e modello: regolatore di pressione unidirezionale con valvola di by-pass AR20KF-02G-B di SMC;
- Campo di pressione di regolazione: da 0.5 a 8.5 bar;



### REGOLATORE DI FLUSSO

- Costruttore e modello: regolatore di flusso in scarico AS2201F-02-06 di SMC
- Campo di lavoro: da 1 a 10 bar



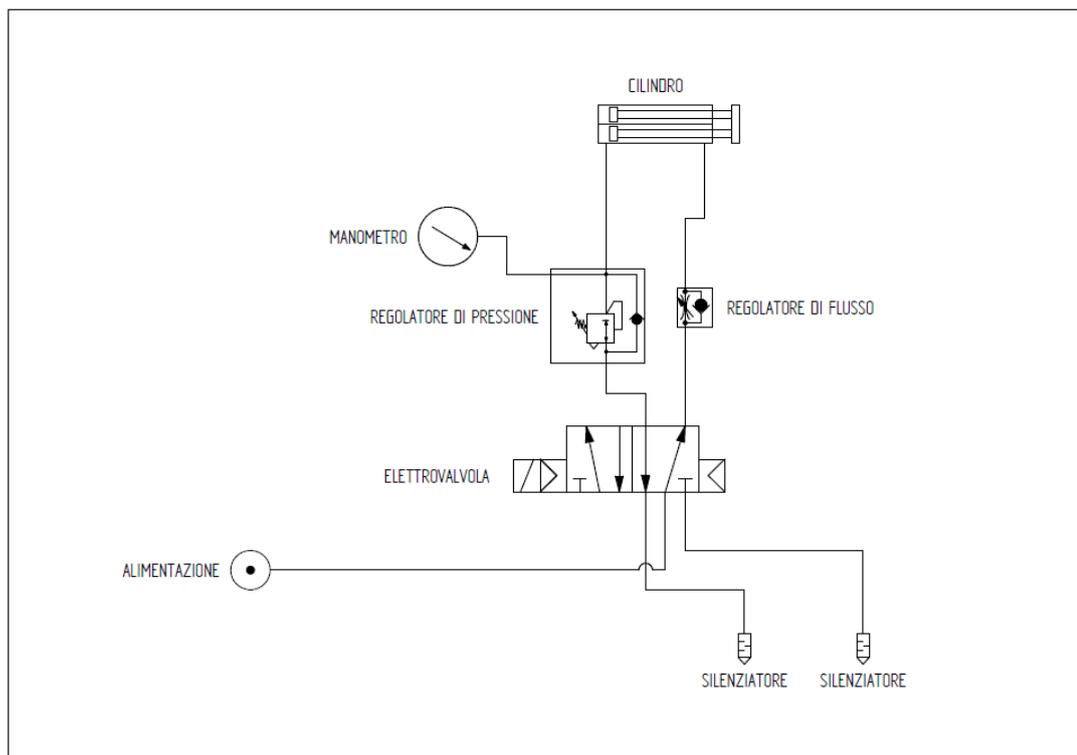


Fig. 5.1: Schema del sistema pneumatico. Si noti l'elettrovalvola in posizione di riposo, che comporta il completo arretramento degli steli del cilindro.

#### 4. Asse verticale

Il movimento verticale è realizzato tramite un'unità lineare (composta da un pattino a ricircolazione di sfere mosso da un sistema puleggia-cinghia ad anello chiuso, la cui puleggia è calettata ad un riduttore epicicloidale) e un motore elettrico. La posizione d'arresto è individuata tramite una fotocellula posta sopra alla testa, la cui funzione sarà spiegata nel paragrafo dedicato al ciclo della macchina.

La scheda di calcolo per il dimensionamento dei componenti e le caratteristiche di quelli scelti sono elencate qui di seguito:

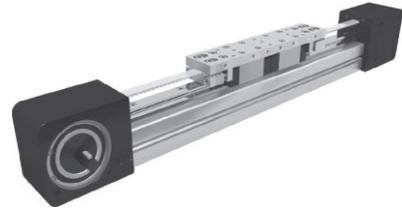
DIMENSIONAMENTO ASSE VERTICALE			
DATI	SIMBOLO/FORMULA	QUANTITA'	U.M.
Massa da movimentare	m	10,000	kg
Lunghezza tratto da percorrere	L	3200,000	mm
Velocità richiesta stimata	$v_0$	40,000	m/min
Tempo di accelerazione	$t_1$	0,300	s
Z puleggia	z	22,000	
Passo cinghia	p	5,000	mm
<b>ANALISI VELOCITA'</b>			
Avanzamento per giro puleggia	$z \cdot p$	110,000	mm/giro

Velocità puleggia richiesta	$n_{2,o} = v_o / (z * p)$	363,636	rpm	
Velocità max in ingresso al riduttore	$n_1 \text{ max}$	3000,000	rpm	
Rapporto di riduzione richiesto	$n_1 \text{ max} / n_2$	8,250		
<b>ANALISI COPPIA E POTENZA</b>				
Diametro primitivo puleggia	$d = z * p / \pi$	35,032	mm	
Forza peso	$F_p = m * g$	98,100	N	
Accelerazione	$a = v_o / t_1$	2,222	m/s <sup>2</sup>	
Forza inerziale	$F_i = m * a$	22,222	N	
Forza totale	$F_{tot} = F_p + F_i$	120,322	N	
Coppia alla puleggia allo spunto	$M_{2,start} = d / 2 * F_{tot}$	2,108	Nm	
Coppia alla puleggia in lavoro	$M_2 = d / 2 * F_p$	1,718	Nm	
Potenza richiesta	$P_2 = M_2 * n_2$	65,400	W	
<b>RIDUTTORE</b>		<b>BONFIGLIOLI</b>		
Modello		LC 050-1-7		
Rapporto di riduzione	$i$	7,000		
Inerzia	$J_r$	0,060	kgcm <sup>2</sup>	
Rendimento	$\eta$	0,970		
Coppia nominale albero lento	$M_2 n$	12,000	Nm	
Coppia di spunto ammissibile	$M_{2amm}$	20,000	Nm	
Velocità nominale (duty cycle S1)	$n_1 \text{ max}$	3000,000	rpm	
<b>MOTORE</b>		<b>MT</b>		
Modello		TN 56A/2		
Potenza	$P_n$	0,090	kW	
Velocità nominale (@ 50 Hz)	$n$	2700,000	rpm	
Coppia nominale	$M_n$	0,320	Nm	
Coppia di spunto (% coppia nominale)	$M_{sp}$	2,000	Nm	
Inerzia di rotore	$J_m$	1,850	kgcm <sup>2</sup>	
Costante di coppia	$\tau$	0,710	Nm/A	
<b>VERIFICA VELOCITA'</b>				
Velocità puleggia (@ 50 Hz)	$n_2 = n / i$	385,714	rpm	
Velocità pattino (@ 50 Hz)	$v = n_2 * z * p$	0,707	m/s	
Frequenza di alimentazione richiesta	$f = 50 * v / v_o$	47,162	Hz	
<b>VERIFICA COPPIA E POTENZA</b>				
Coppia motore richiesta in lavoro	$M_1 = M_2 / i / \eta$	0,253	Nm	
Coppia motore richiesta allo spunto	$M_{1,start} = M_{2,start} / i / \eta$	0,310	Nm	
Potenza richiesta effettiva		71,516	W	
<b>VERIFICA INERZIE</b>				
Inerzia del carico all'albero lento	$J_l = m * v^2 / (n_2)^2$	30,681	kgcm <sup>2</sup>	
Inerzia totale all'albero motore	$J_{tot,1} = J_l / i^2 + J_r$	0,686	kgcm <sup>2</sup>	
Rapporto d'inerzia	$R = J_{tot,1} / J_m$	0,371		
Corrente max richiesta	$I_{max} = M_{1,start} / \tau$	0,437	A	

## UNITA' LINEARE:

- Costruttore e modello: ML 45-12 di Automationware;

- Velocità massima ammissibile:  $v_{max} = 5$  m/s;
- Accelerazione massima ammissibile:  $a_{max} = 10$  m/s<sup>2</sup>;
- Tipo di guida: trapezoidale a ricircolo di sfere;
- Trasmissione del moto: cinghia poliuretanic 16-AT5;
- Diametro primitivo pulegge:  $D_p = 35,03$ ;



#### RIDUTTORE:

- Costruttore e modello: riduttore epicloidale ad uno stadio LC050-1-5 di Bonfiglioli;
- Rapporto di riduzione: 5;
- Rendimento: 97%;
- Momento d'inerzia: 0,07 kg/cm<sup>2</sup>.



#### MOTORE:

- Costruttore e modello: TN 56A/2 di MT Motori Elettrici;
- Potenza nominale: 0.09 kW;
- Numero di poli: 2;
- Velocità nominale (a 50 Hz): 2700 rpm
- Coppia nominale: 0.32 Nm;
- Coppia di spunto: 200% della coppia nominale;
- Momento d'inerzia di rotore: 1,85 kg/cm<sup>2</sup>;
- Costante di coppia: 0,71 Nm/A.



#### INVERTER:

- Costruttore e modello: inverter monofase VZAB0P1BAA OMRON;
- Tensione di alimentazione: 200-240 V, 50-60 Hz;
- Potenza di uscita nominale: 180 W;
- Corrente di uscita nominale: 1,2 A;
- Campo di frequenza in uscita: da 0,05 Hz a 400 Hz.



#### FOTOCCELLULA:

- Costruttore e modello: fotocellula a tasteggio focalizzato DS-S5-5-D100-92 Datalogic;
- Campo di rilevamento: 0-100 mm;

- Tensione di alimentazione: 10-30 Vcc
- Corrente in uscita: 150 mA
- Tempo di risposta: 0,5 ms.



## 5. Ciclo del sistema

Il processo di misurazione è totalmente automatizzato tramite l'utilizzo di un PLC che controlla l'inverter dell'asse verticale, l'elettrovalvola dell'asse orizzontale, il flussaggio con gas Argon e comunica con il PC del GasGlass Laser per avviare la misurazione. I segnali di ingresso per l'avanzamento del programma sono le fotocellule di inizio e fine traino presenti sul convogliatore (lo stesso modello di quella utilizzata sull'asse verticale) e quella posizionata sopra la testa del Laser, e i segnali di output del PC del Laser. Il programma esegue i seguenti passi:

- 1) Avvio del traino a rulli del convogliatore per ricevere il pannello dall'APG;
- 2) Una volta che la fotocellula di inizio traino non rileva più la presenza del vetro il traino viene arrestato fino a nuovo ordine;
- 3) Dopo un tempo di attesa di 300 ms dal segnale di arresto traino (per avere la certezza che il pannello sia effettivamente fermo, dato che l'arresto non è immediato ma viene effettuato con rampa di decelerazione per controllare la posizione di arresto dei pannelli), viene dato il segnale d'avvio dell'asse verticale;
- 4) Quando la fotocellula posta sopra alla testa di misura non rileva più la presenza del vetro l'asse verticale viene arrestato;
- 5) Dopo un tempo di attesa di 100 ms dall'arresto dell'asse verticale l'elettrovalvola di comando del cilindro viene azionata (per un motivo analogo a quello del passo 3: l'arresto viene effettuato con rampa di decelerazione di 300 ms per evitare oscillazioni della testa dovute all'elasticità della cinghia, tuttavia il tempo di attesa è inferiore al tempo di decelerazione per mascherare la bassa reattività del sistema pneumatico, infatti così facendo il cilindro comincia a muoversi quando l'asse verticale è effettivamente fermo), e contemporaneamente viene azionato il soffio di Argon per eliminare l'aria dalla cavità delimitata dalla spugna;
- 6) A 1,5 secondi di distanza dall'attivazione dell'elettrovalvola, per permettere al cilindro di effettuare la sua corsa e al soffio di Argon di riempire la cavità, viene dato l'input al Laser di effettuare la misura;
- 7) Al termine della misura il risultato viene inviato e visualizzato sul PC dell'APG, e contemporaneamente disattivate l'elettrovalvola di comando dell'attuatore pneumatico e l'alimentazione di Argon;

- 8) Una volta ricevuto il consenso dal sensore magnetico del cilindro, che rileva quando lo stelo è completamente arretrato, l'asse verticale riporta la testa alla posizione iniziale e, in base al risultato della misurazione e alla scelta dell'operatore, il traino viene riattivato per far proseguire il pannello o meno.

## 6. Prove

Una volta assemblato il sistema e aggiustate le distanze delle fotocellule per ottenere la misura nella posizione desiderata, sono state tarate la pressione operativa del sistema pneumatico, la velocità del flusso d'aria e la frequenza della tensione di uscita dell'inverter per ottenere le velocità e forze desiderate: la pressione operativa è stata impostata a 2 bar (per poter vincere l'attrito statico), quindi la forza effettiva con cui lo strumento è premuto contro il pannello è di circa 32 N; la velocità del cilindro è stata ridotta a circa 200 mm/s; la frequenza della tensione di uscita dell'inverter è stata portata a 50 Hz per comodità, quindi la velocità dell'asse verticale è stata aumentata a 42,5 m/min.

Le prime prove hanno riguardato il soddisfacimento del tempo di misura, e i risultati sono i seguenti:

- Tempo di misura per pannelli L=1000 mm x H=500 mm x TH=12 mm: 12,5 s;
- Tempo di misura per pannelli L=1000 mm x H=500 mm x TH=24 mm: 12,4 s;
- Tempo di misura per pannelli L=2000 mm x H=1000 mm x TH=16 mm: 14,2 s;
- Tempo di misura per pannelli L=2000 mm x H=1000 mm x TH=24 mm: 14 s;
- Tempo di misura per pannelli L=3000 mm x H=2000 mm x TH=24 mm: 14,5 s;
- Tempo di misura per pannelli L=3000 mm x H=2000 mm x TH=36 mm: 14,2 s;
- Tempo di misura per pannelli L=6000 mm x H=3300 mm x TH=24 mm: 16,5 s;
- Tempo di misura per pannelli L=6000 mm x H=3300 mm x TH=36mm: 16,3 s;
- Tempo di misura per pannelli L=2000 mm x H=1000 mm x TH=80 mm doppia camera: 24 s;

Tutti i tempi sono le medie dei tempi di 5 cicli effettuati sullo stesso pannello, rilevati dall'arresto del vetro sul traino del convogliatore alla sua ripartenza. Dai dati raccolti si evince che la variazione dello spessore totale comporta un lievissimo cambiamento del tempo ciclo, si nota che all'aumentare dello spessore il tempo ciclo diminuisce lievemente (il cilindro percorre un tratto più breve in rientro), mentre l'aumento dell'altezza comporta un più sensibile aumento del tempo richiesto. E' scontato inoltre che la configurazione a doppia camera comporta una considerevole crescita del tempo ciclo per il tempo richiesto dallo strumento per effettuare l'analisi, ma questi pannelli richiedono anche un tempo doppio per essere prodotti dall'APG per cui questo dato ha importanza

relativa. Non sono stati prodotti pannelli con doppia camera di dimensioni massime (6000 x 3300) perché molto ingombranti e pericolosi nella movimentazione manuale, e il tempo ciclo per questi pannelli è poco rilevante, comunque la proiezione per questi pannelli è di 26,5 secondi, che però richiedono anche più tempo per essere accoppiati dall'APG. Da questi risultati l'obiettivo di non creare un collo di bottiglia alla linea è stato pienamente raggiunto.

A questi test sono seguite delle verifiche all'affidabilità del sistema di misura, che però non hanno portato ai risultati sperati, come si vede dalla seguente tabella:

	Concentrazione di Ar misurata con Laser	Concentrazione di O <sub>2</sub> misurata con Dansenor 24 h dopo	Concentrazione di O <sub>2</sub> in aria	Concentrazione di Ar risultante
Pannello 1.1	98,60%	0,30%	21,30%	98,60%
Pannello 1.2	96,20%	0,70%	20,40%	96,60%
Pannello 1.3	94,30%	1,20%	21,20%	94,30%
Pannello 1.4	98,20%	0,40%	20,40%	98,00%
Pannello 1.5	95,70%	0,90%	21,10%	95,70%
Pannello 2.1	93,50%	1,30%	20,60%	93,70%
Pannello 2.2	97,60%	0,50%	20,70%	97,60%
Pannello 2.3	95,50%	1,00%	21,30%	95,30%
Pannello 2.4	98,50%	0,30%	20,90%	98,60%
Pannello 2.5	97,30%	0,60%	20,50%	97,10%
Pannello 3.1	96,90%	0,70%	20,90%	96,70%
Pannello 3.2	93,40%	1,40%	20,60%	93,20%
Pannello 3.3	93,00%	1,40%	20,30%	93,10%
Pannello 3.4	95,60%	0,90%	21,00%	95,70%
Pannello 3.5	95,40%	1,00%	20,60%	95,10%
Pannello 4.1	94,00%	1,20%	20,70%	94,20%
Pannello 4.2	97,40%	0,50%	20,90%	97,60%
Pannello 4.3	96,40%	0,80%	20,90%	96,20%
Pannello 4.4	95,90%	0,90%	21,40%	95,80%
Pannello 4.5	91,20%	1,90%	21,00%	91,00%
Pannello 5.1	95,80%	1,20%	21,20%	94,30%
Pannello 5.2	92,60%	1,30%	21,00%	93,80%
Pannello 5.3	93,80%	0,90%	21,00%	95,70%
Pannello 5.4	94,70%	1,50%	21,20%	92,90%
Pannello 5.5	90,60%	1,60%	20,40%	92,20%
Pannello 6.1	90,10%	2,10%	21,20%	90,10%
Pannello 6.2	92,70%	1,90%	20,30%	90,60%
Pannello 6.3	92,20%	1,50%	20,60%	92,70%
Pannello 6.4	93,90%	0,90%	21,30%	95,80%
Pannello 6.5	92,60%	1,00%	20,80%	95,20%
Pannello 7.1	87,40%	1,90%	20,90%	90,90%
Pannello 7.2	92,00%	0,90%	20,30%	95,60%
Pannello 7.3	90,20%	2,10%	21,20%	90,10%

Pannello 7.4	94,30%	1,50%	20,50%	92,70%
Pannello 7.5	93,70%	0,40%	20,70%	98,10%
Pannello 8.1	86,60%	2,50%	20,50%	87,80%
Pannello 8.2	89,90%	2,90%	20,40%	85,80%
Pannello 8.3	94,20%	1,60%	21,30%	92,50%

I test sono stati effettuati su set di 5 pannelli di 8 tipologie diverse, corrispondenti alle prime 8 configurazioni elencate per le prove sui tempi ciclo.

Mentre la variazione di spessore non comporta differenze notevoli, si possono notare due comportamenti importanti per i quali è necessario rivedere il progetto iniziale: in primo luogo i valori riscontrati dal Laser per i vetrocamera alti 1000 mm, sia per il distanziatore da 12 che per quello da 6, rispecchiano in maniera sufficientemente fedele la concentrazione effettiva misurata a 24 ore di distanza, mentre così non è per le vetrare più alte, sui quali invece è stato riscontrato il comportamento previsto per il quale era stato stabilito il valore minimo di 92%, e questo fa sì che sia necessario dividere in due casi l'analisi, uno per vetri con altezza pari o inferiore a 1000 mm e uno per gli altri; in secondo luogo la differenza tra la concentrazione misurata dal Laser e quella controverificata il giorno successivo è troppo elevata, soprattutto nei pannelli più grandi, e cosa ancor peggiore si è verificato che non solo pannelli accettabili sarebbero stati scartati (previa verifica manuale quindi sarebbero in realtà stati recuperati) ma anche il viceversa, cioè che pannelli non conformi sarebbero stati ritenuti riempiti a sufficienza. Per risolvere questo problema è stata rivista la procedura con cui viene fatta la misura

## 7. Miglioramenti al progetto iniziale

Per risolvere i problemi emersi dalle prove sopra descritte sono state apportate sostanzialmente due modifiche.

La prima, come scritto sopra, è stata dividere in due casi l'analisi: il software ora deciderà automaticamente in base alle dimensioni dei pannelli quale valore è da ritenere accettabile, per i pannelli con altezza pari o inferiore a 1000 mm il 95%, per altezze superiori resta il 92% inizialmente stabilito. E' stata considerata anche la possibilità di una discretizzazione con una risoluzione più ampia, o per lo meno dell'inserimento di un terzo caso con un terzo valore, ma non è stato ritenuto necessario perché questo sistema ha l'obiettivo principale di effettuare una verifica puntuale nelle produzioni di massa senza diminuire la produttività della linea, e queste sono quasi esclusivamente di pannelli di dimensioni contenute, sicuramente inferiori al metro di altezza, mentre per l'analisi di pannelli di grandi dimensioni questo sistema deve coprire la maggior parte delle esigenze ma in caso di dubbio l'analisi di precisione è demandata all'operatore.

La seconda modifica ha comportato anche una revisione della componentistica del sistema, infatti per ridurre l'incertezza di misura nei pannelli grandi è stato deciso di effettuare due misure a due altezze differenti e farne la media, ma questo necessita di portare la testa di misura a delle quote ben precise (nella fattispecie a 1/3 e a 2/3 dell'altezza del pannello), e per fare ciò è stato necessario rimuovere il motore asincrono e sostituirlo con un motore brushless di potenza equivalente, il quale è dotato di encoder al fine di operare il posizionamento sincrono dello strumento di misura lungo l'asse verticale. E' stato anche sostituito di conseguenza l'inverter con un servozionamento adeguato al motore, rimossa la fotocellula posta sopra alla testa non essendo più necessaria, e modificato il software per posizionare la testa in base alle altezze del pannello. Le caratteristiche della coppia motore-azionamento utilizzati sono riportate qui di seguito:

#### **MOTORE:**

- Costruttore e modello: motore brushless con freno d'emergenza BMH 0701-P-16-F2A Schneider Electric;
- Potenza nominale: 0.42 kW;
- Velocità nominale: 3000 rpm;
- Coppia nominale: 1,34 Nm;
- Coppia di picco: 4,20 Nm;
- Inerzia di rotore con freno: 0,70 kgcm<sup>2</sup>;
- Costante di coppia: 0,79 Nm/A;

#### **SERVOAZIONAMENTO:**

- Costruttore e modello:

Non è stato necessario eseguire verifiche di dimensionamento avendo il motore brushless caratteristiche superiori all'asincrono che ha sostituito.

Il ciclo macchina è rimasto il medesimo rispetto al precedente per i vetri piccoli, a parte il fatto che la testa è posizionata in altezza prima che il pannello arrivi sul traino, risparmiando così tempo, ad una quota pari a 100 mm in meno dell'altezza del vetro; per le vetrocamere più alte di 1000 mm invece il ciclo macchina prevede:

- Posizionamento della testa a 1/3 dell'altezza del pannello prima del suo arrivo;
- Allo stop del vetro sul traino viene fatto uscire il cilindro e effettuata la prima misurazione;

- Quando il sensore magnetico sul cilindro verifica che lo stelo è completamente rientrato il primo dato viene memorizzato dal PC dell'APG e la testa viene portata a 2/3 dell'altezza del pannello;
- Fermata la testa viene effettuata la seconda misurazione;
- Il cilindro viene ritirato e se il valore medio tra i due misurati è superiore al 92% il vetro viene fatto procedere sul traino, altrimenti resta sul traino fino a nuovo ordine dall'operatore.

A seguito della modifica sono state fatte altre prove simili alle precedenti ma solo sui pannelli di tipo 7 e 8 (6000 x 3300 x 24 e x 36), con le quali è stato rilevato che:

- Il tempo ciclo è aumentato a 24 secondi (che rispetta comunque il tempo richiesto), con una proiezione per le doppie camere a 44 secondi;
- L'incertezza di misura è stata ridotta e nessun vetro non conforme è risultato accettabile per il sistema, come si vede dalla tabella sottostante:

Pannello 7.6	95,00%	0,40%	20,40%	98,00%
Pannello 7.7	92,00%	1,00%	20,50%	95,10%
Pannello 7.8	89,10%	1,60%	20,80%	92,30%
Pannello 7.9	94,60%	0,30%	20,40%	98,50%
Pannello 7.10	92,40%	0,90%	20,50%	95,60%
Pannello 8.6	86,60%	2,30%	20,70%	88,90%
Pannello 8.7	93,50%	0,80%	20,90%	96,20%
Pannello 8.8	88,20%	1,70%	20,70%	91,80%
Pannello 8.9	91,70%	1,10%	20,50%	94,60%
Pannello 8.10	92,60%	1,00%	20,70%	95,20%



## Conclusioni

Dopo aver ottimizzato il sistema risolvendo i problemi emersi durante il primo test, si può concludere che gli obiettivi sono stati raggiunti e i risultati sono stati soddisfacenti, dato che l'applicazione in linea dello strumento Sparklike GasGlass Laser è riuscito a soddisfare le richieste del mercato della produzione del vetrocamera, riuscendo ad offrire un controllo puntuale ed affidabile sulle produzioni di massa di pannelli di vetrocamera, semplificando e agevolando la manodopera a compiere controlli sui pannelli più grandi, che prima risultavano molto difficoltosi e scomodi, e offrendo inoltre ai tecnici e ai manutentori un feedback sulle condizioni di lavoro delle presse. Questa applicazione si rivela quindi di grande utilità, ed apre la strada a sistemi di controllo più evoluti come possono essere da una parte sistemi equipaggiati con strumenti precisi (come lo è il Laser qui utilizzato) che effettuino analisi puntuali e conformi alle procedure descritte nelle normative, potendo quindi rilasciare report validi per ogni singolo pannello prodotto; dall'altra sistemi di analisi integrati alle presse per il controllo di processo.

## Bibliografia

- Sito web Fenzi Group, produttore di sigillanti e profili distanziatori
- Sito web Forel, produttore di macchinari per il vetrocamera e il vetro piano
- Brevetto numero EP 2 422 033 B1 di Schuler, Peter e intestato a Bystronic-Lehnardt GmbH
- Brevetto numero EP 2 093 370 A2 di Vianello, Fortunato e intestato a Forel Base
- Brevetto numero US 2014092379A1 di Niiranen, Kai e Lauro, Erno e intestato a Sparklike Oy
- Sito web e assistenza tecnica di Sparklike
- “Introduzione alle misure elettroniche” di Sona, Alessandro e Bertocco, Matteo
- Wikipedia e sito web Enciclopedia Treccani
- Sito web Dansensor
- Siti web dei produttori dei vari componenti meccanici ed elettronici per le specifiche

## Ringraziamenti

In primo luogo desidero ringraziare il professor Sona, che si è dimostrato sempre gentile e disponibile nell'indirizzarmi per il completamento e la stesura della tesi. Un grande ringraziamento ai miei genitori Michele e Mariagrazia per i sacrifici fatti per permettermi di intraprendere e completare questo percorso e il supporto morale costante, e a mio fratello Mauro, che mi ha sempre sostenuto con positività nei momenti di buio. Un grazie a mio zio Fortunato, mia zia Nadia e mio cugino Riccardo che mi hanno permesso di sviluppare il qui presente progetto nella loro azienda, e all'ing. Dino Moschini, che mi ha aiutato nelle ricerche bibliografiche e seguito nella realizzazione del progetto, nonché consigliato sulla redazione della presente tesi. Infine un ringraziamento alle mie care amiche Caterina ed Enrica, che mi hanno sopportato con pazienza e supportato con preziosi consigli, e a tutti i miei amici e conoscenti che hanno sempre creduto in me, ma anche a chi non ci credeva perché mi ha dato un ulteriore stimolo a completare questo percorso.