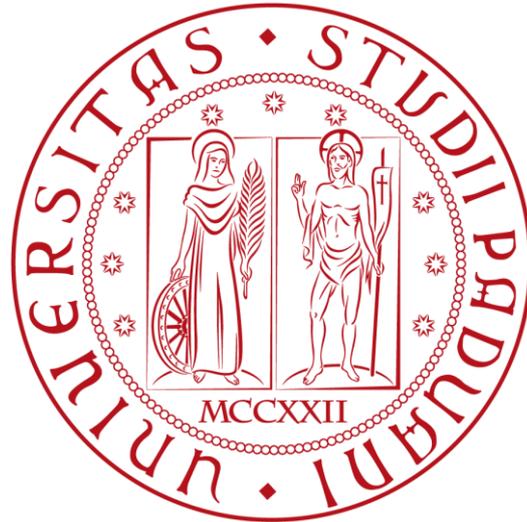


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

Corso di laurea in Ingegneria delle Telecomunicazioni



CONTROLLO AUTOMATICO DI SPESSORE (AGC) IN UN
LAMINATOIO A CALDO

Relatore: **Prof. Mauro Bisiacco**

Tutor aziendale: **Ing. Roberto Carlesso**

Tesi di laurea di **Alessandro Bottazzo**

Matricola: **574762**

Anno Accademico 2010/2011

Indice

1 INTRODUZIONE	6
1.1 ALLUMINIO E DEFORMAZIONE PLASTICA	9
1.2 TRATTAMENTI TERMICI.....	10
1.3 LEGHE DA DEFORMAZIONE PLASTICA.....	11
1.4 PRINCIPALI LEGHE DI ALLUMINIO.....	13
.	
2 TEORIA DELLA LAMINAZIONE A CALDO	15
2.1 DESCRIZIONE DELLA GABBIA DI LAMINAZIONE.....	17
2.2 PROCESSO DI LAMINAZIONE.....	20
2.2.1 VON KARMAN.....	21
2.2.2 ARCO DI CONTATTO, BOMBATURA POSTIVA E NEGATIVA	22
2.2.3 CILINDRI DI LAVORO-SOSTEGNO E TIPI DI LAMINATOI	23
2.2.4 ROLL-BENDING POSITIVO E NEGATIVO	25
2.3 SEZIONE NEUTRA.....	27
2.4 AGC (AUTOMATIC GAP CONTROL)	31
2.5 DIFETTI DI LAMINAZIONE.....	33

3 STUDIO DEL SISTEMA ATTUALE	36
3.1 SISTEMA DI CONTROLLO SPESSORE GABBIA SBOZZATORE.	36
3.1.1 CONTROLLO DI POSIZIONE DELLE CAPSULE IDRAULICHE.	40
3.1.2 ANELLO DI POSIZIONE.	41
3.2 AGC DEL SISTEMA ATTUALE.	43
3.3 IBA.	51
3.4 BENDING DEL SISTEMA ATTUALE.	54
4 PROGETTO DEL SISTEMA DI CONTROLLO NUOVO	55
4.1 COLLEGAMENTI AGC-BENDING NEL NUOVO SISTEMA DI CONTROLLO	57
4.2 DURATA DEL PROGETTO.	58
4.3 SUSTAINING INVESTMENT E MIGLIORIE INTRODOTTE.	59
4.4 CONTRIBUTO DEL LAUREANDO AL PROGETTO.	60
4.5 SPECIFICAZIONE DETTAGLI.	64
5 CONCLUSIONI	69
APPENDICE	71

Elenco delle figure

Figura 2.1: schema generale della laminazione.	15
Figura 2.2: bite e gap.	20
Figura 2.3: Von Karman	21
Figura 2.4: arco di contatto.	22
Figura 2.5: esempi di bombatura positiva e negativa.	23
Figura 2.6: work rolls e back-up rolls.	23
Figura 2.7: esempi di gabbia tipo Duo, Quarto, Sesto.	24
Figura 2.8: roll-bending positivo e negativo.	26
Figura 2.9: sezione neutra.	27
Figura 2.10: metodo grafico per individuare la sezione neutra.	29
Figura 2.11: schema a blocchi di un sistema AGC.	31
Figura 3.1: AGC e Bending presenti attualmente nel laminatoio a caldo di Fusina.	37
Figura 3.2: collegamenti del sistema AGC con PLC sbozzatore.	40
Figura 3.3: schema funzionamento scheda ASSI.	41
Figura 3.4: gabbia senza carico e con carico (Stretch)	44
Figura 3.5: variazione dello spessore in uscita H_{out}	45
Figura 3.6: (a) diagramma forza-spessore; (b) diagramma forza-gap; (c) correlazione tra spessore di ingresso, spessore di uscita e forza di laminazione.	46
Figura 3.7: posizione attuale media dei vitoni.	48

Figura 3.8: (a) andamento dei vari parametri lungo una serie di passi di laminazione; (b) andamento dei vari parametri in un singolo passo di laminazione.	52
Figura 4.1: schema del nuovo sistema di controllo.	56
Figura 4.2: collegamenti del nuovo sistema AGC-Bending con PLC sbozzatore.	57
Figura 4.3: la tabella mostra la durata del progetto.	58
Figura 4.4: sincronizzazione dei dati.	61
Figura 4.5: blocco di programma per lo scambio dati.	62
Figura 5.1: nuovo sistema di controllo (AGC-Bending)	69
Figura 5.2: ulteriore passo di ammodernamento dell'impianto.	70

Capitolo 1

INTRODUZIONE

In questa relazione verrà spiegato il funzionamento del sistema di controllo automatico di spessore in un laminatoio a caldo; l'analisi e la modellizzazione di una gabbia di laminazione; lo studio del sistema **AGC** attuale ed in particolare la descrizione del nuovo sistema **AGC** che sarà installato all'Alcoa Trasformazioni di Fusina dove il sottoscritto ha svolto il proprio tirocinio.

Panoramica su Alcoa Corporate

Alcoa è il produttore leader a livello mondiale di alluminio primario, alluminio lavorato e allumina. Oltre ad avere inventato l'industria odierna dell'alluminio, l'innovazione di Alcoa ha incluso tappe fondamentali nel settore aerospaziale, automobilistico, imballaggio, edilizia e costruzioni, trasporto commerciale ed industria elettronica nel corso degli ultimi 120 anni.

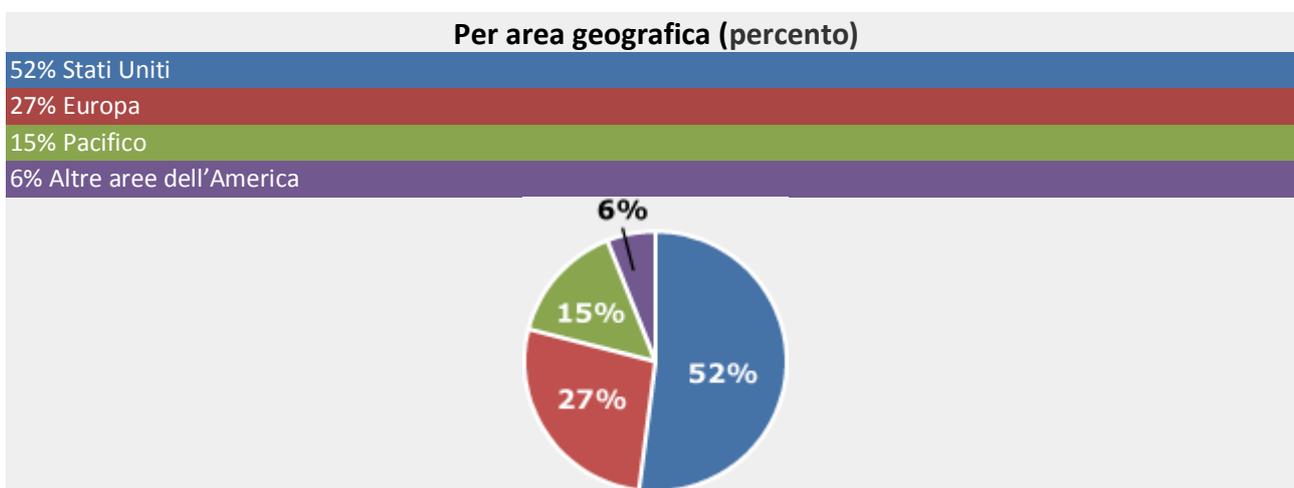
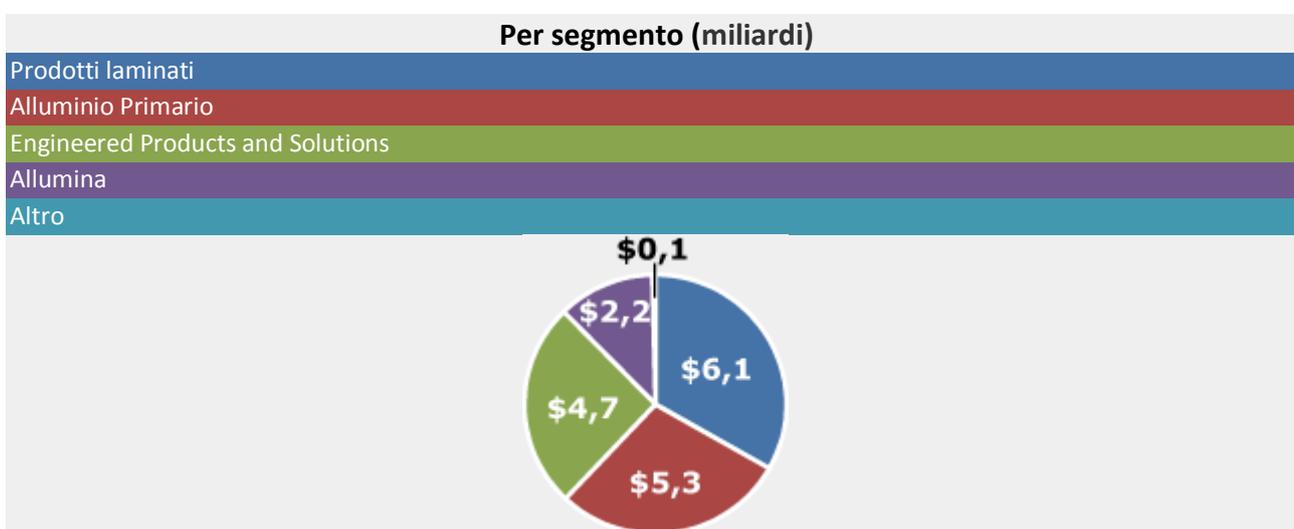
Le soluzioni commercializzate da Alcoa comprendono prodotti laminati, estrusi in leghe dure e forgiati, nonché ruote, sistemi di fissaggio, fusione di precisione e a cera persa, strutture e sistemi architettonici, oltre alla propria competenza in altri metalli leggeri come super-leghe a base di titanio e nichel.

La sostenibilità è parte integrante delle pratiche operative di Alcoa così come del design del prodotto e della progettazione offerta ai clienti.

Alcoa è membro del Dow Jones Sustainability Index da otto anni consecutivi e circa il 75 per cento di tutto l'alluminio dal 1888 è tuttora in uso.

Alcoa è presente nel mondo con circa 59000 dipendenti in 31 paesi.

I ricavi ottenuti da Alcoa solo nel 2009 sono stati di 18,4 miliardi di Dollari.



I prodotti che produce Alcoa sono: placche, billette, pani da fonderia, alluminio puro; fusioni e leghe per turbine per il settore aerospaziale ed industriale; forgiati ed estrusi in alluminio; ruote forgiate in alluminio (commerciali, passeggeri); sistemi di fissaggio (industriale, trasporto, aerospaziale); prodotti per il settore edile e costruzioni; prodotti laminati (piastre, lamiere, fogli).

Alcoa Trasformazioni di Fusina

In particolare Fusina presenta uno stabilimento di 350 dipendenti.

Esso è costituito da un laminatoio, una fonderia ed uno stabilimento primario.

In termini di produzione Fusina attualmente garantisce all'incirca 80000 tonnellate annue di cui 40000 tonnellate sono piastre e 40000 tra nastri e lamiere.

Le principali aree di business e mercato sono: lamiere per uso navale, aeronautico, civile (settore edile e stampaggio) e piastre per uso militare ed ingegneria generica.

Le leghe maggiormente prodotte sono le leghe ad alto titolo di magnesio (5082-5086-5754).

1.1 ALLUMINIO E DEFORMAZIONE PLASTICA

L'alluminio è un metallo duttile che si estrae principalmente dai minerali di bauxite, un ossido idrato dell'alluminio che contiene dal 50% al 60% di Al_2O_3 (allumina), dall'1 al 20% di Fe_2O_3 (ematite), dall'1 al 10% di SiO_2 (silice) e quantità minori di altri minerali con un contenuto di acqua che varia dal 20 al 30%.

È un metallo leggero con un aspetto bianco – argenteo a causa del leggero strato di ossidazione che si forma rapidamente quando è esposto all'aria e che previene la corrosione in quanto non solubile.



L'alluminio è l'elemento chimico facente parte dei metalli del blocco p e le cui proprietà generali sono le seguenti:

- Elemento di numero atomico 13 con struttura reticolare a temperatura ambiente cubica a facce centrate;
- Configurazione elettronica $\text{Ne}3s^23p^1$;
- Densità $2,70 \text{ g/cm}^3$;
- Durezza Brinell 2,75;
- Punto di fusione 660° C ;
- Carico di rottura 55 – 91 MPa;
- Modulo di elasticità 66,6 GPa;
- Allungamento a rottura 55%;
- Basso peso specifico;
- Elevata resistenza alla corrosione;

- Alta conducibilità termica ed elettrica;
- Atossicità;
- Elevata plasticità;
- Eccellente duttilità e malleabilità;
- Basso potere radiante;
- Ottima saldabilità;

Le leghe di alluminio si dividono in leghe da fonderia per fabbricazione di getti ed in leghe da deformazione plastica per la produzione di laminati, estrusi e forgiati.

La classificazione internazionale (Alluminium Association) prevede un sistema di quattro cifre in cui:

1. la prima indica la famiglia di leghe;
2. la seconda le eventuali varianti rispetto alla lega originaria, alla quale è riservata la cifra 0;
3. le due ultime cifre indicano infine il grado di purezza dell'alluminio e nelle altre serie definiscono specificatamente la combinazione di alliganti;

1.2 TRATTAMENTI TERMICI

Inoltre l'Alluminium Association prevede per la classificazione dell'alluminio la collocazione di una lettera, separata da un trattino, che descrive la successione dei trattamenti termici e meccanici che il materiale subisce prima di essere messo in opera.

Le principali lettere e cifre hanno il seguente significato:

- **F**: "grezzo di laminazione";
- **O**: "ricotto cristallizzato";
- **H**: "incrudito";
- **W**: "temprato ed invecchiato naturalmente";
- **T**: "trattato termicamente".

1.3 LEGHE DA DEFORMAZIONE PLASTICA

La maggior parte delle leghe di alluminio viene utilizzata allo stato semilavorato, cioè viene realizzata per deformazione plastica.

Grazie all'affinamento e all'omogeneizzazione del grano e all'indurimento introdotto dalla lavorazione meccanica della lega laminata, viene aumentata la resistenza meccanica.

Le leghe si suddividono in due grosse categorie: leghe non trattabili termicamente cioè induribili solo per deformazione plastica a freddo e leghe trattabili termicamente, cioè induribili per precipitazione di fasi coerenti e semicoerenti.

I principali trattamenti termici dell'alluminio e delle leghe di alluminio comprendono:

- ricottura;
- distensione;
- solubilizzazione;
- indurimento per precipitazione.

Il trattamento termico si riferisce a tutte quelle operazioni di raffreddamento e di riscaldamento che sono eseguite con l'intento di cambiare proprietà meccaniche, struttura metallurgica o lo stato di stress residuo di un prodotto metallico. Quando si parla di alluminio però s'intende in particolare le specifiche operazioni impiegate per incrementare la durezza e la resistenza delle leghe suscettibili di indurimento per precipitazione, queste sono generalmente indicate come le "heat treatable alloys". Tale meccanismo consiste in un aumento della difficoltà nel moto delle dislocazioni a seguito di un'opportuna distribuzione di particelle all'interno dei grani. E'opportuno evitare la formazione dei precipitati a bordo grano, dal momento che il bordo grano si comporta già come una barriera al moto dislocazionale.

Un essenziale attributo affinché una lega indurisca per precipitazione è che il suo diagramma di fase presenti la curva di solubilità che aumenta con la temperatura.

Il trattamento termico tipico consiste in due stadi noti come solubilizzazione ed invecchiamento.

Solubilizzazione: nel primo ciclo, un'opportuna lega è riscaldata ad una temperatura al di sopra della curva di solubilità allo scopo di ottenere una soluzione omogenea, poiché la seconda fase, presente generalmente in minor quantità, dissolve nella più abbondante fase. La lega viene dunque lasciata a questa temperatura sino a quando si ottiene una soluzione solida omogenea,

quindi viene temprata ad una temperatura più bassa per creare una condizione di supersaturazione.

Invecchiamento: un metodo usato per sviluppare le proprietà delle leghe è quello di condurre una precipitazione controllata di particelle molto fini sia a temperatura ambiente sia elevata. In genere, la precipitazione non comincia immediatamente ma richiede un “incubation time” per formare dei nuclei sufficientemente grandi e stabili; dopo di che può avere inizio il processo di crescita.

La velocità alla quale avviene la precipitazione varia con la temperatura. A temperature molto basse la velocità di reazione è controllata dalla velocità alla quale gli atomi possono migrare. A temperature appena al di sotto la velocità di precipitazione è molto bassa, poiché la velocità di nucleazione è bassa essendo la soluzione solo leggermente sovrasatura quindi in questo caso la precipitazione è controllata dalla velocità con cui i nuclei possono formarsi.

A temperature intermedie, la velocità di precipitazione aumenta sino a raggiungere un massimo e quindi il tempo per completare la precipitazione è molto breve.

1.4 PRINCIPALI LEGHE DI ALLUMINIO

Serie 1000 : alluminio industrialmente puro almeno 99 %. Leghe caratterizzate da: eccellente resistenza alla corrosione, conducibilità termica ed elettrica elevate, buona lavorabilità, caratteristiche meccaniche piuttosto basse.

Serie 2000 : il principale elemento di lega è il Rame. Si tratta di leghe da trattamento termico.

Serie 3000 : il principale elemento di lega è il Manganese, il quale consente di aumentare la resistenza meccanica delle leghe lavorate e di ridurre la sensibilità alla corrosione intergranulare ed alla stress corrosion.

Serie 4000 : il principale elemento di lega è il Silicio, esso comporta un aumento di fluidità e una riduzione del coefficiente di dilatazione termica.

Serie 5000 : il principale elemento di lega è il Magnesio, il quale conferisce doti particolari di resistenza alla corrosione, oltre a buona resistenza a caldo ed ottime doti di duttilità e lavorabilità. In generale non richiede trattamento termico di invecchiamento e presenta buona saldabilità per fusione.

Serie 6000 : i principali elementi di lega sono il Silicio ed il Magnesio. Si tratta di leghe da trattamento termico; dopo il trattamento termico sviluppano caratteristiche meccaniche intermedie, in generale inferiori a quelle delle leghe della serie 2000.

Presenta buona formabilità, lavorabilità, truciolabilità e saldabilità. Costituisce la classe principale di leghe per i pezzi lavorati a caldo e per quelli ricavati da fusione. Esse riescono a combinare alcune caratteristiche favorevoli: buone resistenze meccaniche, sensibilità relativamente bassa alla tempra, buona resistenza alla corrosione.

Serie 7000 : il principale elemento di lega è lo Zinco, l'elemento che ha la solubilità più elevata nell'alluminio. Generalmente le leghe binarie Al-Zn non vengono usate, ma vengono preferite leghe Al-Zn-Mg. Si tratta di leghe da trattamento termico; queste leghe sviluppano le caratteristiche meccaniche più elevate tra le leghe d'Alluminio; lo Zinco aumenta la resistenza e la durezza, oltre a favorire l'autotemperabilità della lega.

Presentano buona lavorabilità alle macchine utensili e, nella maggior parte dei casi, scarsa saldabilità per fusione. Vengono utilizzate per strutture aeronautiche e di mezzi di trasporto, ed in generale per parti molto sollecitate.

Capitolo 2

TEORIA DELLA LAMINAZIONE A CALDO

Scopo della laminazione è ridurre un blocco di Alluminio attraverso successive operazioni di riduzione di spessore in un nastro avente determinate proprietà metallurgiche, proprietà meccaniche, caratteristiche geometriche e superficiali.

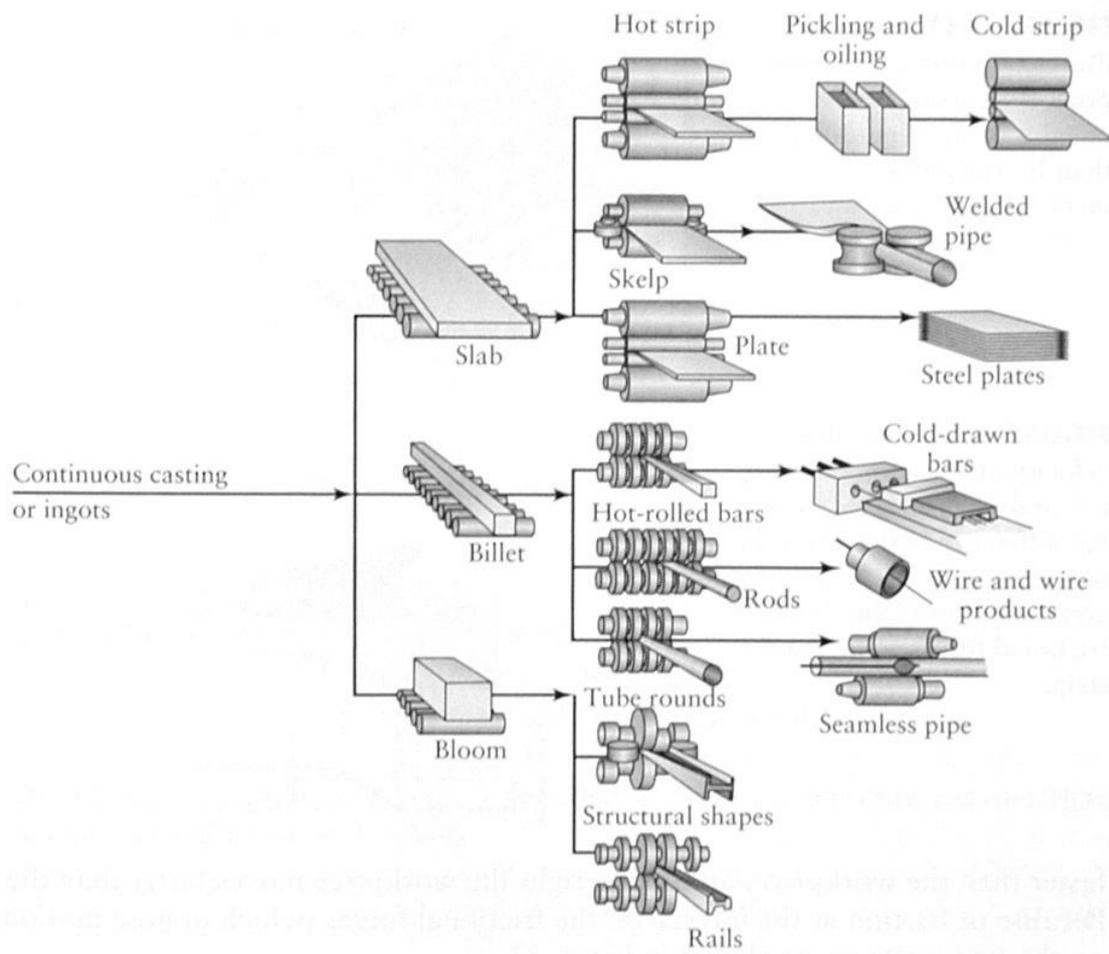


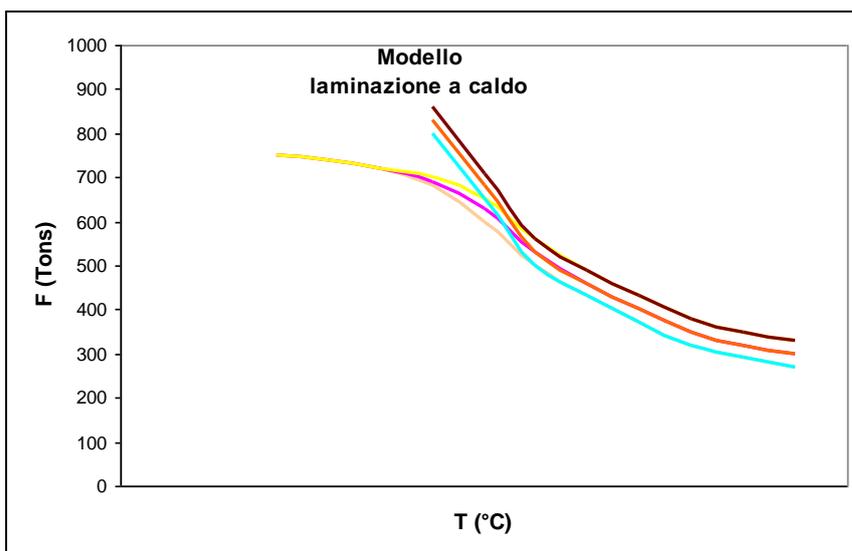
Figura 2.1: schema generale della laminazione

La laminazione si può suddividere in laminazione a caldo e laminazione a freddo.

Le differenze principali tra i due tipi di laminazione sono:

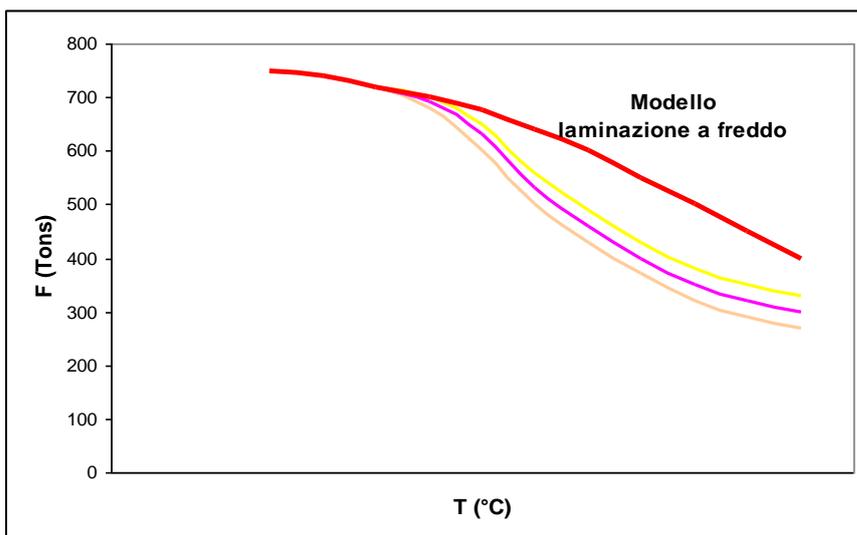
LAMINAZIONE A CALDO:

- bassa durezza del materiale;
- notevole spessore del laminato;
- notevole dimensione dell'arco di contatto;
- notevole distanza tra le zone di flusso ristretto.



LAMINAZIONE A FREDDO:

- elevata durezza del materiale;
- modesto spessore del laminato,
- piccolo arco di contatto;
- zone di flusso frenato (praticamente sovrapposte)



2.1 DESCRIZIONE DELLA GABBIA DI LAMINAZIONE

La struttura principale è costituita da due portali fissati al telaio di base. Questo è costituito da una coppia di massicce “scarpe” a loro volta ancorate alla fondazione.

Ogni portale (housing) è un monoblocco formato da due colonne (column) dette “spalle”, da una traversa superiore e da una traversa inferiore; in prossimità di questa le colonne recano all'esterno le mensole di ancoraggio alle scarpe. L'apertura delimitata dai quattro elementi descritti del portale viene chiamata finestra.

1 Vitone

2 Guarnitura cilindro di sostegno sup.

3 Guarnitura cilindro di lavoro sup.

4 Allunghe

5 Guarnitura cilindro di lavoro inf.

6 Guarnitura cilindro di sostegno inf.

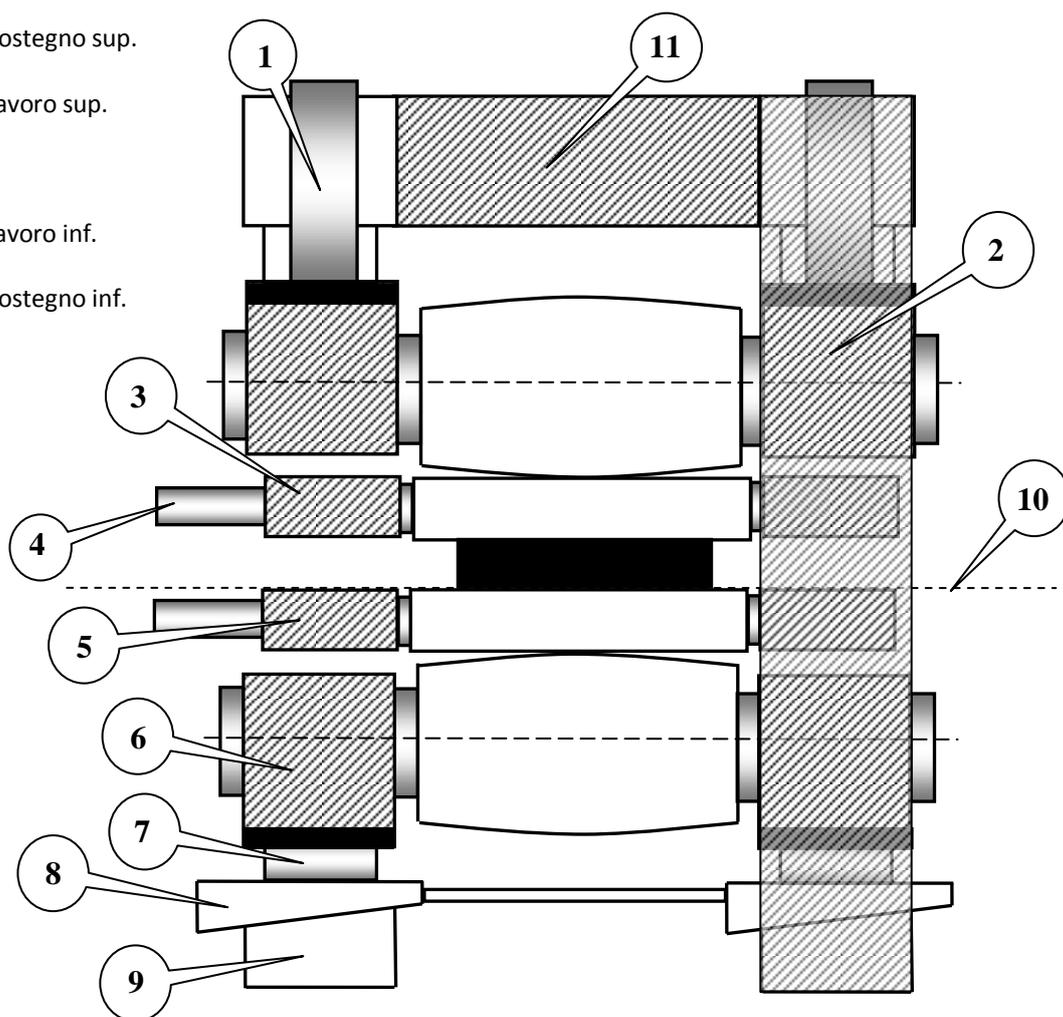
7 Capsule idrauliche

8 Cunei

9 Scarpe

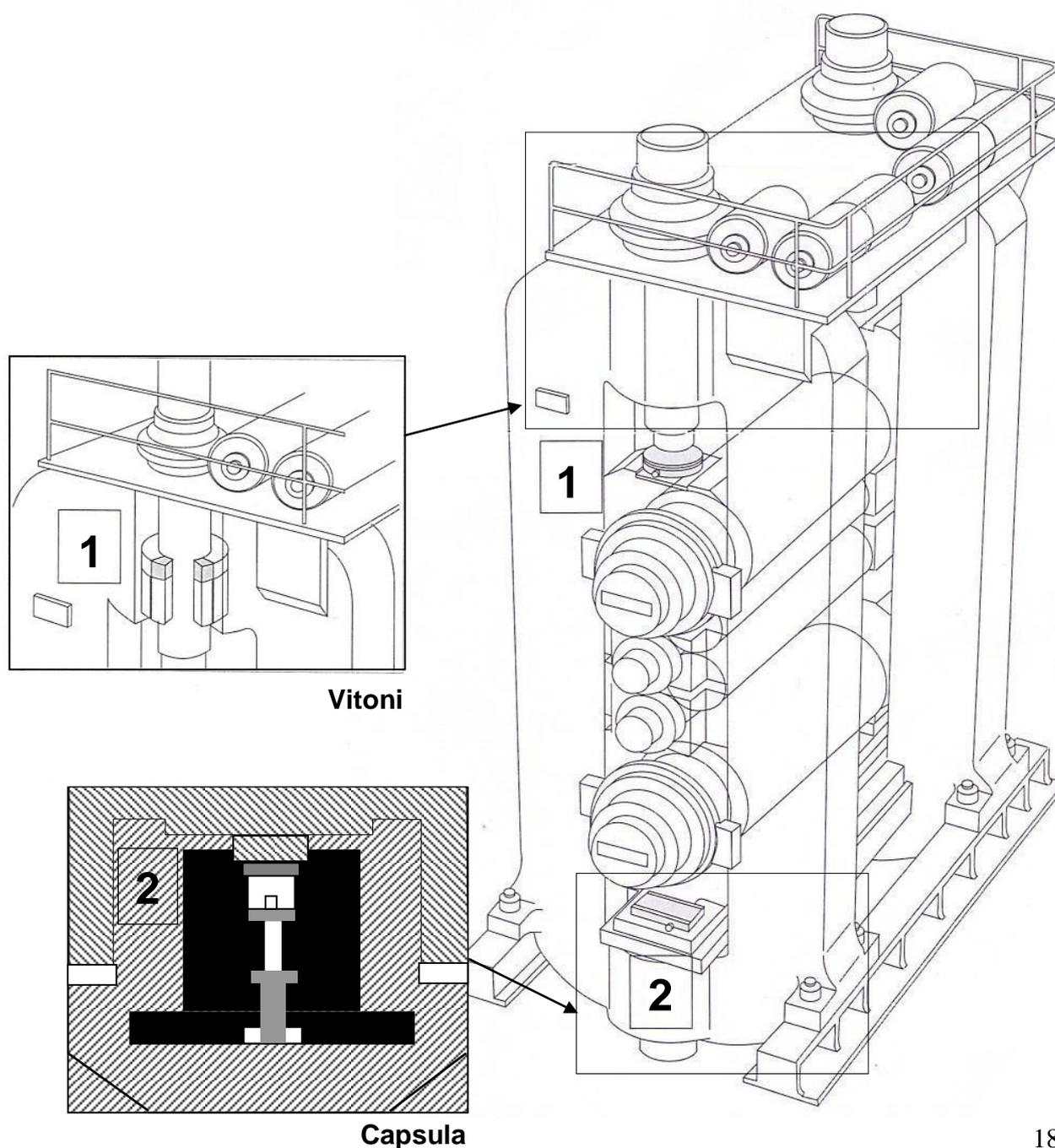
10 Passline

11 Traversa superiore



In basso, le spalle sono collegate a due a due dalle scarpe, un ulteriore elemento, anch'esso detto "traversa" collega i due portali nella parte superiore, assemblando il tutto.

Altro elemento fondamentale che appartiene alla gabbia sono i cilindri. La finitura superficiale dei cilindri di lavoro è determinante per le caratteristiche della superficie del laminato e, quanto più sottile è il nastro, tanto più essa è importante per il controllo della velocità di processo. Il moto ai cilindri è trasmesso dalle allunghe (spindles) le quali lo derivano dallo sdoppiatore azionato dal motore.



Il dispositivo che genera il carico di laminazione (rolling load), viene realizzato utilizzando una coppia di robuste viti, dette appunto vitoni, una in ciascuna spalla, inserita nella traversa superiore con il compito di esercitare pressione sulla guarnitura superiore. Il carico applicato a ciascuna spalla si trasmette attraverso il cilindro (o gruppo di cilindri) sovrastanti il nastro, al materiale da laminare, quindi passa al cilindro inferiore, per scaricarsi poi, tramite la guarnitura inferiore.

Col passare degli anni si sono avuti enormi sviluppi dell'oleodinamica che hanno consentito di utilizzare speciali cilindri oleodinamici di grosso diametro e piccola corsa, dette capsule idrauliche, in grado di realizzare i grossi carichi necessari per produrre il carico di laminazione. Un ulteriore vantaggio della capsule idrauliche è dato dalla presenza nel circuito di controllo di un sistema di emergenza che in caso di sovraccarico intollerabile mette immediatamente a scarico la pressione delle capsule.

Mentre i vitoni sono sempre installati nella parte superiore della gabbia, le capsule idrauliche possono essere installate sia nella parte alta della finestra, tra guarnitura di sostegno superiore e traversa, sia a fondo finestra, sotto la guarnitura di sostegno inferiore.

2.2 PROCESSO DI LAMINAZIONE

Il principio base della laminazione è lo stesso per entrambi i due tipi di laminazione: il metallo viene deformato e ridotto di spessore dalla pressione generata da una coppia di cilindri paralleli controrotanti.

Come mostra la figura 2.2, il metallo viene fatto passare nel vano esistente tra i due cilindri detto bite, la cui apertura viene detta gap.

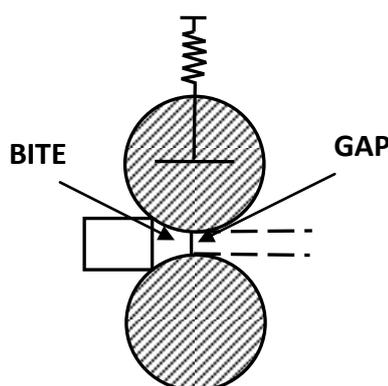


Figura 2.2: bite e gap

Bisogna distinguere il caso di bite simmetrico rispetto all'asse di laminazione dal caso di bite asimmetrico.

Nel caso di simmetria le tensioni interne sono ovviamente simmetriche e distribuite qualitativamente nel seguente modo:

- basso valore del rapporto tra il raggio dei cilindri e lo spessore di entrata del nastro, cioè cilindri di piccolo diametro rispetto allo spessore del nastro;
- Alto valore del rapporto tra raggio dei cilindri e spessore di entrata del nastro, cioè i cilindri presentano un grosso diametro rispetto allo spessore del nastro;

Nel caso di asimmetria nel bite, questa può essere dovuta a diverso valore dei parametri di laminazione, quindi diverso diametro o diversa rugosità superficiale dei cilindri o diverse condizioni di lubrificazione.

Gli effetti consistono nell'incurvamento del nastro in uscita verso l'alto o verso il basso. Se lo spessore è sottile è possibile anche la lacerazione del nastro.

2.2.1 VON KARMAN

Poiché la pressione è il rapporto tra la forza e l'area della superficie di contatto tra i corpi tra i quali la forza è scambiata si ha, in questo caso, che la forza è il carico di laminazione (rolling load) generato dalla macchina, mentre la superficie è data dal prodotto della larghezza del laminato per la lunghezza dell'arco di contatto (**vedi Figura 2.3**).

Equazione di Von Karman:
$$2P_x \cdot \tan \alpha dx + 2\tau dx + \sigma_x \frac{dH_x}{dx} + H_x \frac{d\sigma_x}{dx} = 0$$

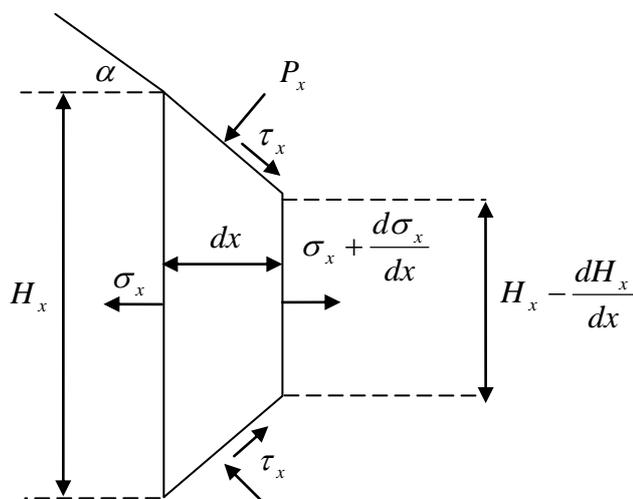


Figura 2.3: Von Karman

2.2.2 ARCO DI CONTATTO, BOMBATURA POSITIVA E NEGATIVA

Ciò che caratterizza l'area di contatto, quindi la pressione, è l'arco di contatto (**vedi Figura 2.4**).

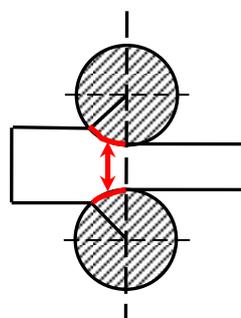


Figura 2.4: Arco di contatto

A sua volta l'arco di contatto è caratterizzato dalla differenza tra lo spessore di entrata e quello di uscita e dal diametro dei cilindri (più piccolo è il diametro tanto più corto è l'arco).

Quindi tanto più grande è la resistenza alla deformazione del materiale da laminare, tanto più alta è la pressione richiesta cioè il diametro dei cilindri deve essere piccolo.

Il carico di laminazione richiesto per operare una certa riduzione, dipende da quattro fattori principali:

- durezza del metallo;
- dimensione della regione di flusso frenato;
- distanza tra le due regioni di flusso frenato;
- quantità e qualità di lubrificante presente nel bite.

Il carico di laminazione viene applicato mediante i supporti dei cilindri. La reazione a questo carico avviene lungo il contatto tra i cilindri ed il materiale. La pressione distribuita lungo i cilindri ne causa una certa flessione quindi il gap non rimane rettangolare ma assume una forma detta a "barilotto", la quale non è accettabile. La soluzione è data da un'opportuna sagomatura conferita ai cilindri detta bombatura (camper), la quale deve essere tale da bilanciare la deformazione del cilindro. Il valore della bombatura da applicare è dato dalla differenza tra la misura del diametro a centro tavola e la misura del diametro alle estremità della tavola (**vedi Figura 2.5**).

Si può pensare che per contrastare la flessione dei cilindri sia opportuno aumentarne la rigidità, ma essa è funzione del diametro. Aumentando il diametro, aumenta la lunghezza dell'arco di

contatto e quindi per ottenere la pressione necessaria bisognerebbe aumentare il valore del carico applicato, il quale genererebbe un ulteriore aumento della flessione.

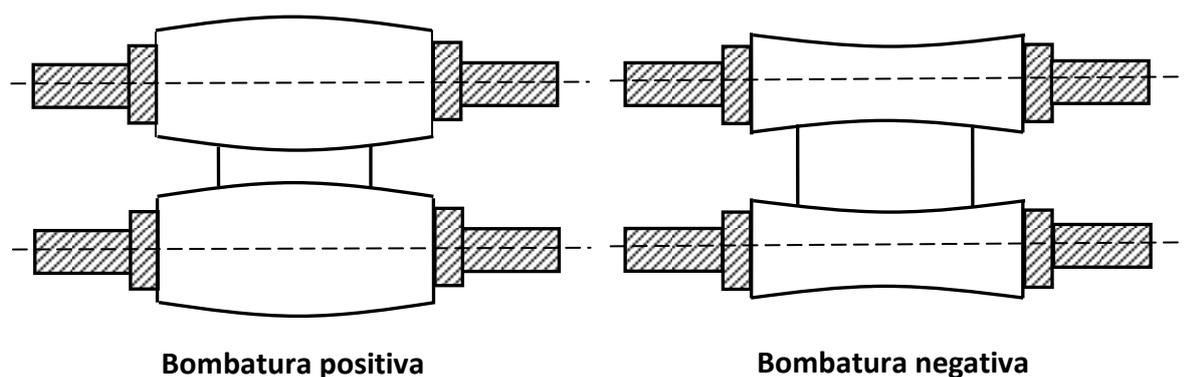


Figura 2.5: esempi di bombatura positiva e negativa

La soluzione trovata è stata quella di sdoppiare le mansioni affidate ai cilindri raddoppiando il numero dei cilindri.

2.2.3 CILINDRI DI LAVORO-SOSTEGNO E TIPI DI LAMINATOI

Il compito di laminare è affidata alla coppia di “cilindri di lavoro” (work rolls), i quali sono di piccolo diametro mentre il compito di supportare il carico di laminazione è affidata alla coppia di cilindri di sostegno (back-up rolls) i quali presentano grandi diametri (vedi Figura 2.6).

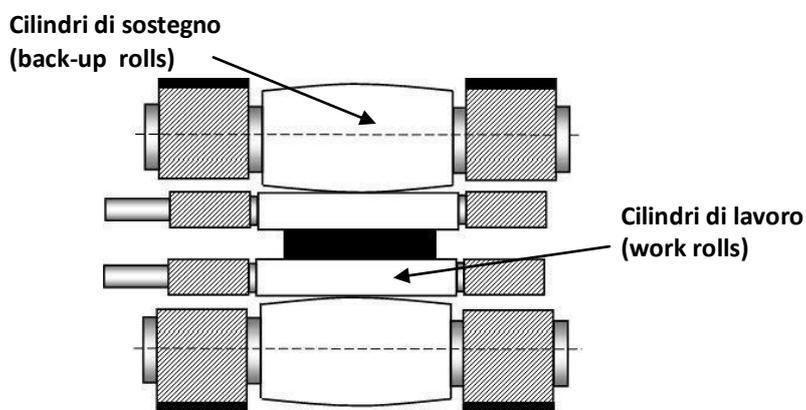


Figura 2.6: work rolls e back-up rolls

Per i cilindri di lavoro, motorizzati con velocità di rotazione uguali ed opposte, c'è l'obbligo di avere il diametro rigorosamente uguale essendo cinematicamente accoppiati tramite il nastro.

Mentre il cilindro di sostegno inferiore poggia sul fondo finestra, sostenendo anche il peso del cilindro di lavoro inferiore, i cilindri superiori devono essere sostenuti mediante un dispositivo, detto bilanciamento, per tenere il gap aperto; inoltre le guarniture di sostegno inferiori e superiori alloggiavano i martinetti idraulici del sistema bending che, come vedremo in seguito, nella configurazione positiva permettono di mantenere il cilindro di lavoro superiore in contatto con il cilindro di backup superiore, evitandone il distacco.

I laminatoi di questo tipo sono detti laminatoi con gabbia tipo "Quarto". Vi possono essere anche laminatoi con gabbia tipo "Duo" o "Sesto" (vedi Figura 2.7).

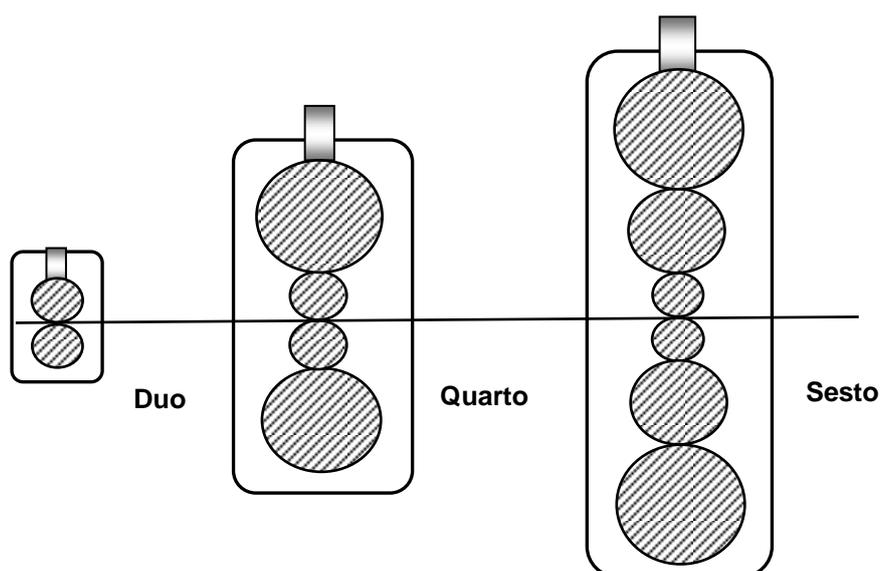


Figura 2.7: esempi di gabbia tipo Duo, Quarto, Sesto

Il valore del diametro minimo dei cilindri di lavoro è legato alla seguente relazione:

$$D > \frac{(S_e - S_u)}{(1 - \cos \varphi)}$$

con S_e lo spessore di entrata e S_u lo spessore di uscita; ϕ dipende solo dai materiali a contatto e dal lubrificante interposto, quindi il diametro D è condizionato dalla riduzione e ciò è assai importante nei laminatoi a caldo per i primi passi, dove si desidera eseguire riduzioni importanti (>25mm) per le quali necessitano cilindri di grosso diametro.

2.2.4 ROLL-BENDING POSITIVO E NEGATIVO

Nei laminatoi di tipo Quarto vi è la possibilità di conferire ai cilindri di lavoro una flessione (roll bending) imposta (**vedi Figura 2.8**). Il **roll- bending** può essere:

- **positivo**, se il suo effetto simula una bombatura positiva dei cilindri di lavoro;
- **negativo**, se il suo effetto simula una bombatura negativa dei cilindri di lavoro.

Tale flessione è realizzata dai martinetti idraulici di bilanciamento dei cilindri di lavoro, i quali, oltre appunto la funzione di bilanciamento conferiscono ai cilindri di lavoro una certa flessione. Se alimentati con pressione più elevata e modulata, conferiscono un roll bending positivo. Per il roll bending negativo invece sono installati ulteriori martinetti idraulici per il cilindro di lavoro superiore, nel corpo delle guarniture con reazione contro le guarniture del cilindro di sostegno superiore. Per il cilindro di lavoro inferiore, nel corpo delle guarniture di sostegno inferiori, con reazione contro le guarniture del cilindro di lavoro. Questi martinetti realizzano le spinte necessarie per conferire al rispettivo cilindro di lavoro un roll bending negativo.

Il roll bending è controllato in manuale dall'operatore oppure in automatico.

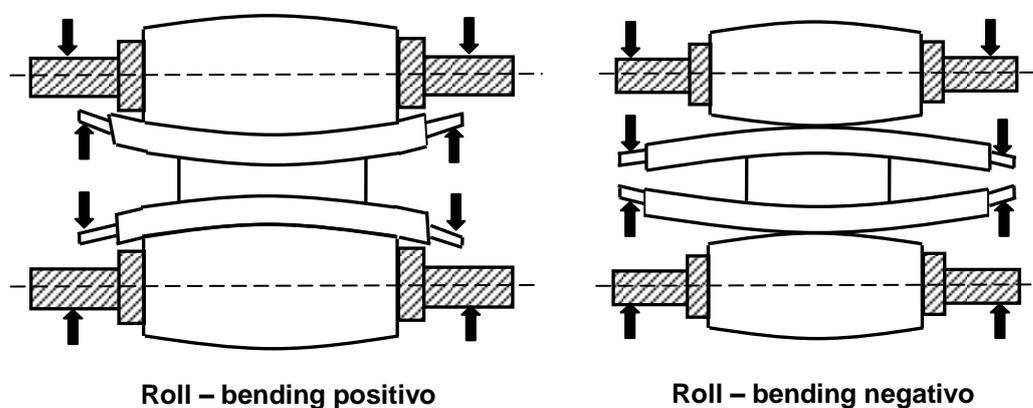


Figura 2.8: Roll – bending positivo e negativo

Il controllo dello spessore del nastro laminato è un aspetto importante e delicato del processo.

Gli elementi che determinano lo spessore del nastro laminato sono:

- l'apertura del vano tra i cilindri: il gap,
- il tiro applicato al nastro;
- la velocità di laminazione.

Il **gap** perché dal momento che la riduzione di spessore del nastro che avviene durante la laminazione è dovuta alla pressione applicata, esso influenza tale pressione.

Il **tiro** applicato al nastro aiuta ad ottenere la riduzione dello spessore abbassando la resistenza della deformazione. Il tiro comporta una riduzione dell'arco di contatto con relativo aumento della pressione al contatto quindi ad un T (variazione di tiro) positivo corrisponde un R (variazione della riduzione) positivo (aumento della riduzione).

La **velocità**, perché un aumento della velocità comporta un aumento della riduzione, cioè una diminuzione dello spessore di uscita.

2.3 SEZIONE NEUTRA

Si abbia in ingresso un pezzo di spessore h_0 , il quale entra nello spazio tra i due rulli ad una velocità v_0 , in uscita si otterrà dunque un pezzo di spessore e velocità rispettivamente h_f e v_f (vedi figura 2.9)

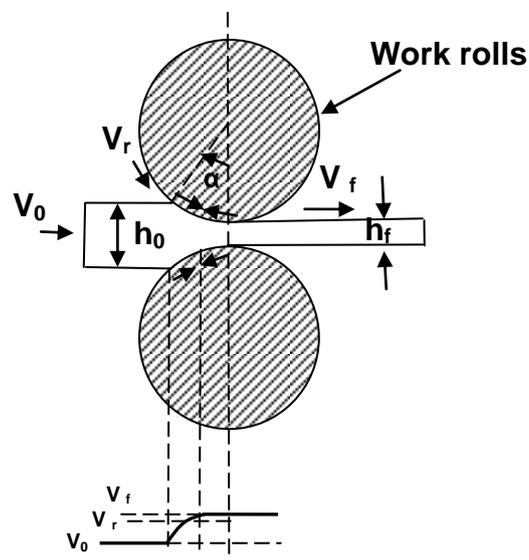


Figura 2.9: sezione neutra

Siano S_0 la sezione d'imbocco, S_1 la sezione d'uscita ed S_i la sezione generica. Siano v_r la velocità periferica dei rulli, v_{0m} la velocità media del materiale nella sezione S_0 , v_{1m} la velocità media del materiale nella sezione S_1 e v_{im} la velocità media del materiale nella sezione S_i .

Per il principio di conservazione della portata si ha: $v_{0m} S_0 = v_{1m} S_1 = v_{im} S_i$. Poiché la sezione diminuisce costantemente dall'ingresso all'uscita, la velocità media cresce altrettanto costantemente ed essendo $S_0 > S_i > S_1$ sarà $v_{0m} > v_{im} > v_{1m}$.

Bisogna introdurre il concetto di velocità media in quanto i punti di una generica sezione non hanno la medesima velocità nella direzione di laminazione; pertanto la velocità media è la media fra le velocità puntuali, cioè un vettore che ha direzione e verso analoghi a quelli delle velocità puntuali e modulo uguale alla coordinata della retta di compensazione del diagramma vettoriale di tali velocità. In parete la velocità è sempre v_0 , mentre verso il centro essa diminuisce in quanto l'effetto di trascinamento dovuto alle forze di attrito esercitate dalle pareti è sempre meno intenso. Lo spostamento di un punto della sezione solida non è determinato solo dal trascinamento dei cilindri ma anche dall'allungamento prodotto dalla compressione che essi esercitano sulla sezione. L'effetto dell'allungamento è quello di conferire alla sezione una velocità che andrà a sommarsi a quella delle forze di trascinamento, con distribuzione opposta, nel senso

che nel punto centrale l'effetto delle forze di trascinamento è minimo mentre quello delle forze di compressione è massimo. Se immaginiamo di spostarci dalla sezione di ingresso verso quella di uscita, possiamo osservare che l'effetto delle forze di trascinamento cambia in quanto l'area della sezione diminuisce e, per analoga ragione, quello delle forze di compressione è crescente. Così, man mano che la sezione diminuisce, la velocità media dovuta ad entrambi gli effetti aumenterà fino a superare quella dei cilindri.

Se $v_{1m} > v_r$ ne deriva che, mentre il diagramma vettoriale delle velocità puntuali in S_0 è concavo, in S_1 è convesso. Quest'inversione del profilo è dovuta al seguente motivo: in S_0 la velocità puntuale è massima all'estremità e quindi nella zona di contatto con i cilindri; si può quindi affermare che la forza di attrito "tira" mentre il materiale si "oppone", invece in S_1 la velocità è massima al centro e quindi è il materiale che "tira" mentre la forza d'attrito si "oppone". Da ciò, si desume che in S_1 la forza d'attrito ha verso opposto alla forza d'attrito in S_0 . Infatti in S_1 il materiale è più veloce dei cilindri anche per effetto della compressione.

Se in S_0 il profilo di velocità è concavo mentre in S_1 è convesso, esisterà una sezione S_n in cui la velocità è costante e la velocità media è uguale a v_r .

Tale sezione è detta sezione neutra, è importante perché è l'unica in cui la velocità media è uguale alla velocità periferica dei cilindri.

L'angolo neutro α è l'angolo tra il punto neutro ed il piano d'uscita.

La differenza tra la velocità del nastro laminato e la velocità periferica del rullo vale $f = \alpha^2(h_0 - h_f)/h_f$.

Esiste un metodo grafico che ci permette di individuare la sezione neutra.

Consideriamo l'arco definito dai punti A e B, tracciamo per A una retta r inclinata di un certo angolo ρ e per B una retta s inclinata di un angolo $-\rho$. La loro intersezione identifica la posizione della sezione neutra (vedi Figura 2.10).

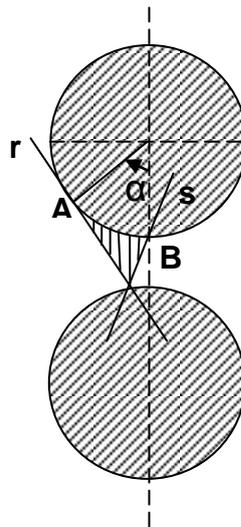


Figura 2.10: metodo grafico per individuare la sezione neutra

Queste considerazioni sul punto neutro e sul comportamento delle forze di attrito ci consentono di comprendere le condizioni che determinano l'allargamento nel corso della laminazione. Infatti quando il materiale attraversa i cilindri non subisce solo un allungamento ma anche una deformazione in direzione trasversale, detta "allargamento" espresso dalla differenza $\Delta L = L_o - L_i$ dove L_o è la larghezza del laminato dopo il passaggio nella gabbia mentre L_i è la larghezza dello stesso prima del passaggio.

Un allargamento è sempre da contenere in quanto porterebbe, se eccessivo, al rapido deterioramento del laminatoio per la collisione con i montanti della gabbia.

I parametri da cui dipende l'allargamento sono numerosi:

- composizione della lega: in particolare dipende dalla concentrazione di carbonio;
- temperatura: se aumenta la temperatura, diminuisce l'allargamento perché aumenta la deformabilità;

- coefficiente d'attrito: crescendo il coefficiente, aumentano le forze d'attrito e quindi l'aderenza fra materiale e cilindro;
- diametro dei cilindri: se aumenta D , aumenta l'arco di contatto e l'allargamento;
- schiacciamento: se aumenta lo schiacciamento aumenta a parità di diametro l'arco di contatto e l'allargamento. Per questo si preferisce ottenere un determinato schiacciamento in più passaggi di laminazione;
- spessore del materiale all'imbocco: aumentando lo spessore del materiale, la parte centrale del materiale risente meno dell'effetto di trascinamento dei cilindri e quindi prevale lo spostamento trasversale che favorisce l'allargamento.
- larghezza iniziale del materiale: aumentando la larghezza iniziale, aumenta la quantità di materiale da spostare lateralmente in fase d'allargamento e quindi le forze d'attrito da vincere nella direzione trasversale, ciò determina una diminuzione dell'allargamento;
- velocità periferica dei cilindri: aumenta l'allargamento al diminuire della velocità periferica.

Nel laminatoio di Fusina è presente un dispositivo, detto edger o gabbia verticale, che permette di laminare anche i bordi della placca a richiesta dell'operatore, e ha la funzione di contenere l'allargamento del laminato, mantenendo la larghezza finale desiderata (oltre a mitigare difetti sui bordi, quali cricche e rotture, dovute ad alte concentrazioni di impurità presenti ai bordi della placca di alluminio iniziale).

2.4 AGC (AUTOMATIC GAP CONTROL)

I sistemi AGC sono diventati sempre più affidabili e precisi con il progresso della tecnologia.

L'AGC è un sistema di controllo automatico di spessore che prevede dei sensori, un'apparecchiatura di elaborazione dei segnali, degli attuatori. Lo schema a blocchi di un sistema AGC è il seguente:

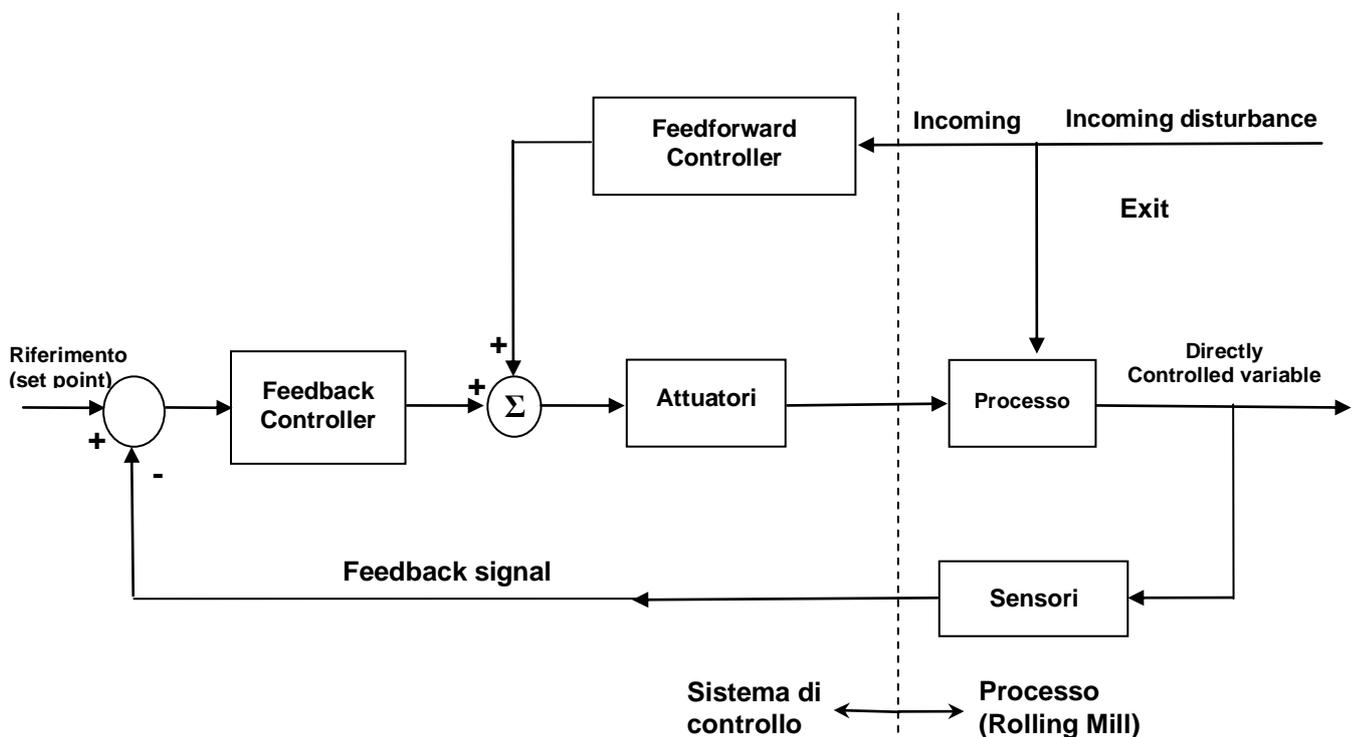


Figura 2.11: schema a blocchi di un sistema AGC

Feedback elements (sensori): hanno il compito di raccogliere dati come la forza, la velocità, lo spessore, la tensione e la corrente in tempo reale.

La misura del gap: ad ogni cambio cilindri si esegue l'azzeramento della distanza tra gli assi dei cilindri di sostegno, dal quale valore parte il calcolo del gap. Un encoder lineare inserito nel centro di ciascuna capsula fornisce una misura accurata della escursione delle capsule stesse. Il dato fornito dal sensore confrontato con il diagramma carico/allungamento della gabbia memorizzato nell'elaboratore fornisce un valore preciso del gap.

La misura del tiro: è affidata alla misura di corrente assorbita dai motori degli assi.

La misura della velocità: la velocità periferica dei cilindri è data dal prodotto tra il diametro noto dei cilindri e la loro velocità di rotazione misurata.

I dati provenienti dai sensori vengono elaborati dal computer (feedback controller) il quale presenta dei valori di set dei vari parametri. Quindi in funzione della deviazione riscontrata vengono inviati i comandi agli attuatori secondo una strategia di regolazione, la prima riguarda la disponibilità del segnale relativo al valore attuale dello spessore, la seconda riguarda la gerarchia nell'utilizzo degli attuatori;

Disponibilità del segnale relativo al valore attuale dello spessore

- **Feedback AGC:** se il misuratore è installato nella zona di uscita del laminatoio viene fornita l'indicazione dello spessore del nastro già laminato. In base alla deviazione del valore rilevato rispetto al valore obiettivo si agisce per operare gli opportuni interventi correttivi.
- **Feedforward AGC:** se il misuratore è installato nella zona di entrata del laminatoio questo consente al sistema di predisporre gli interventi correttivi necessari in maniera tempestiva.
- **Due misuratori,** uno nella zona di entrata e l'altro nella zona di uscita. E' possibile utilizzare il primo per il Feedforward AGC mentre il secondo dà il feedback dell'avvenuta correzione.

Gerarchia nell'utilizzo degli attuatori

Metodo detto **Gaugemeter:** il misuratore non esiste, si mantiene così il gap costante.

Esso applica la seguente procedura: quando un nastro (placca) entra nel bite si crea una forza di separazione che provoca un allungamento elastico della gabbia; questo si aggiunge al valore di gap desiderato. Quindi il sistema provvede a controllare la pressione idraulica di alimentazione della capsule, al fine di portare la corsa **C** della capsula ad un valore che soddisfa la seguente relazione:

$C = S_0 + \frac{F}{M}$ dove **S₀** è il valore di gap che darà luogo allo spessore di uscita desiderato mentre

F/M è l'allungamento elastico della gabbia corrispondente alla forza divaricatrice in atto.

2.5 DIFETTI DI LAMINAZIONE

Possiamo avere difetti di superficie e difetti di forma.

I difetti di superficie possono derivare da inclusioni nel materiale come scaglie d'ossido, sporco etc. oppure da cause derivanti dai processi pre-laminazione. Nella laminazione a caldo si rimuovono in anticipo gli ossidi con un trattamento alla torcia.

I difetti di forma invece distorcono o compromettono l'integrità di un laminato:

Ondulazioni:



Il bordo ondulato del nastro può essere causato da:

- Cilindri fuori livellamento;
- Rigonfiamento termico laterale dei cilindri dovuto ad errato controllo del raffreddamento
- Nastro a sezione trapezia dalle fasi di processo precedenti.

Cricche e cerniere nel centro (center buckles):



Se la bombatura è eccessiva in senso positivo, la laminazione darà luogo ad un nastro con uno spessore più sottile al centro rispetto ai bordi. Il laminato più sottile si allunga maggiormente, e la lunghezza in eccesso si manifesta come ondulazioni nella parte centrale del nastro. Le cause che possono provocare questa tipologia di difetto sono:

- Insufficiente riduzione nel passo dunque la pressione non è sufficiente a generare la flessione necessaria a bilanciare la bombatura.
- Eccessiva bombatura termica, causata a sua volta da:

- surriscaldamento dei cilindri;
 - insufficiente portata del fluido di raffreddamento;
 - non corretta distribuzione del fluido di raffreddamento.
- Bombatura di rettifica errata.

Cricche al bordo (edge waves):



Se la bombatura di processo è eccessiva in senso negativo, la laminazione darà luogo ad un nastro con spessore più sottile ai bordi che al centro, e quindi si generano ondulazioni ai bordi. Le cause determinanti possono essere:

- Eccessiva riduzione nel passo. La pressione provoca una flessione dei cilindri superiore alla bombatura;
- Insufficiente bombatura termica, causata a sua volta da:
 - cilindri troppo freddi;
 - eccessiva portata del fluido di raffreddamento.
- Distribuzione non omogenea del fluido di raffreddamento.

Si possono verificare anche cricche a circa un quarto della larghezza del nastro laminato (**quarter buckles**). Questo si verifica in particolare nei laminatoi di tipo Quarto, in quanto essi sono muniti del dispositivo di flessione cilindri (Bending).

Un'insufficiente bombatura positiva comporta una sotto-laminazione al centro, quindi una sovra-laminazione ai bordi. Per diminuire la riduzione ai bordi si aumenta il roll-bending positivo, che tende ad allargare il gap alla estremità dei cilindri di lavoro, ma tale flessione dei cilindri di lavoro non riesce a progredire verso il centro oltre un certo valore. Pertanto, mentre si attenua la

riduzione ai bordi, la fascia di sovra-laminazione si allontana dai bordi, ma permane la sotto-laminazione al centro: si creano così delle fasce di sovra-laminazione ai quarti.

Capitolo 3

STUDIO DEL SISTEMA ATTUALE

3.1 SISTEMA DI CONTROLLO SPESSORE GABBIA SBOZZATORE

Il sistema di controllo attuale, ha lo scopo di mantenere lo spessore del laminato costante durante la laminazione agendo sulla posizione relativa dei due cilindri di lavoro della gabbia.

La posizione di questi cilindri è regolata tramite una coppia di capsule idrauliche, collocate nella zona inferiore della gabbia, con servovalvole a retroazione elettronica integrata ad elevata capacità di risposta.

Il sistema di controllo di spessore, attraverso una strategia di regolazione di tipo gaugemeter, calcola le variazioni dello spessore in uscita dalla gabbia a partire dalle misure di forza di separazione e di posizione delle due capsule idrauliche ed elabora un segnale di correzione della posizione capsule messo in atto da un'unità dedicata a microprocessore che realizza l'anello di controllo posizione.

Il sistema di controllo di spessore è costituito da due unità hardware:

- PLC SIEMENS S5-155U
- Unità a microprocessore per il controllo di posizione su due canali con 3 schede formato Doppio Europa aventi le seguenti caratteristiche:
 - Scheda master con CPU principale, memorie, interfacce I/O;
 - Scheda Slave con CPU gestione interfaccia I/O, interfacce analogiche A/D;
 - Scheda ingressi ed uscite analogiche con amplificatori differenziali ed adattatori per segnali in tensione ed in corrente.



Figura 3.1: AGC e Bending presenti attualmente nel laminatoio a caldo di Fusina

Il sistema di controllo svolge le seguenti funzioni:

- Procedura di azzeramento del sistema di misura delle capsule idrauliche (trasduttori SONY Magnescale)
- Controllo della posizione delle capsule idrauliche tramite comando delle servovalvole;
- Calcolo della forza di separazione rilevata da trasduttori di pressione applicati ai cilindri idraulici;
- Comando posizionamento manuale delle capsule e correzione manuale del disallineamento;
- Apertura capsule per cambio cilindri;
- Posizionamento delle capsule idrauliche per raggiungimento pass-line;
- Gestione delle capsule idrauliche durante la procedura di “azzeramento” e “livellamento” gabbia;
- Blocco del circuito idraulico per mantenimento posizione capsule
- Attuazione apertura rapida gabbia in caso di sovrappressione;
- Controllo della variazione dello spessore del laminato con modello Gaugemeter;
- Compensazione dell’effetto della forza di contour (bending);
- Compensazione della variazione di spessore del laminato in funzione della velocità di laminazione della gabbia;
- Diagnostica allarmi del sistema di controllo delle capsule idrauliche;
- Interfaccia HW e SW con il sistema di supervisione;

3.1.1 CONTROLLO DI POSIZIONE DELLE CAPSULE IDRAULICHE

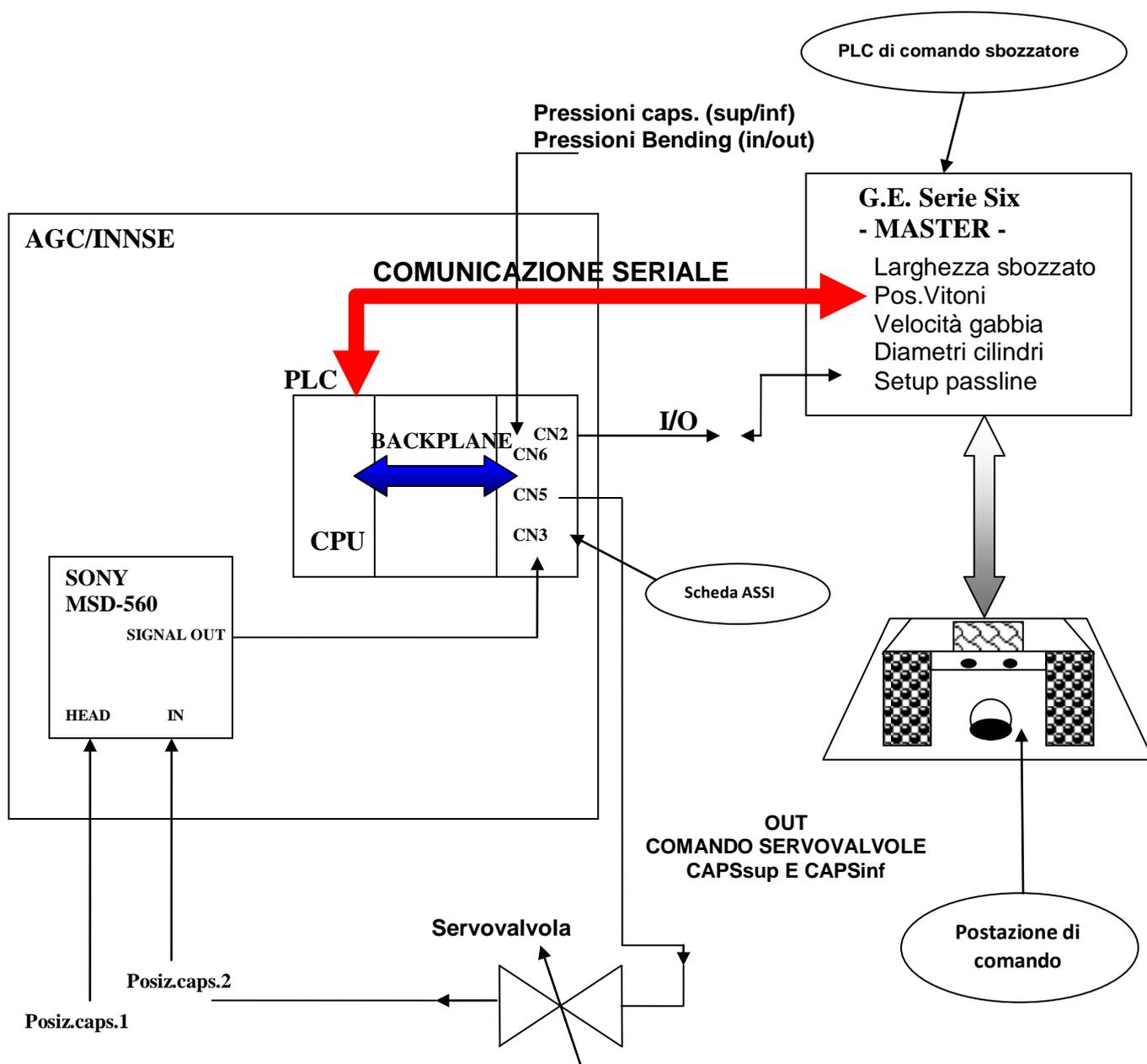


Figura 3.2: Collegamenti del sistema AGC con PLC sbozzatore

3.1.2 ANELLO DI POSIZIONE

La scheda assi è in grado di gestire due assi idraulici ognuno dei quali comprendente una capsula a doppio effetto in controllo di posizione controllata da una servovalvola.

La posizione di ciascun asse è rilevata da un trasduttore di posizione di tipo digitale (encoder assoluto) collegato all'unità SONY MSD-560.

I due anelli di posizione regolano due uscite analogiche di comando alle servovalvole idrauliche con retroazione elettronica integrata.

Il PLC impone un set di posizione capsula a ciascun anello (tramite il bus interno) alla scheda assi, la quale, autonomamente, gestisce il posizionamento cercando di minimizzare l'errore.

La scheda assi, inoltre, acquisisce dal campo, tramite due trasduttori di pressione analogici, le pressioni della camera superiore P_{r1} e della camera inferiore P_{r2} di ciascuna capsula, e le pressioni del bending positivo e negativo; tali valori vengono passati al PLC per il calcolo della deformazione elastica della gabbia al variare della forza di laminazione applicata (**vedi Figura 3.3**).

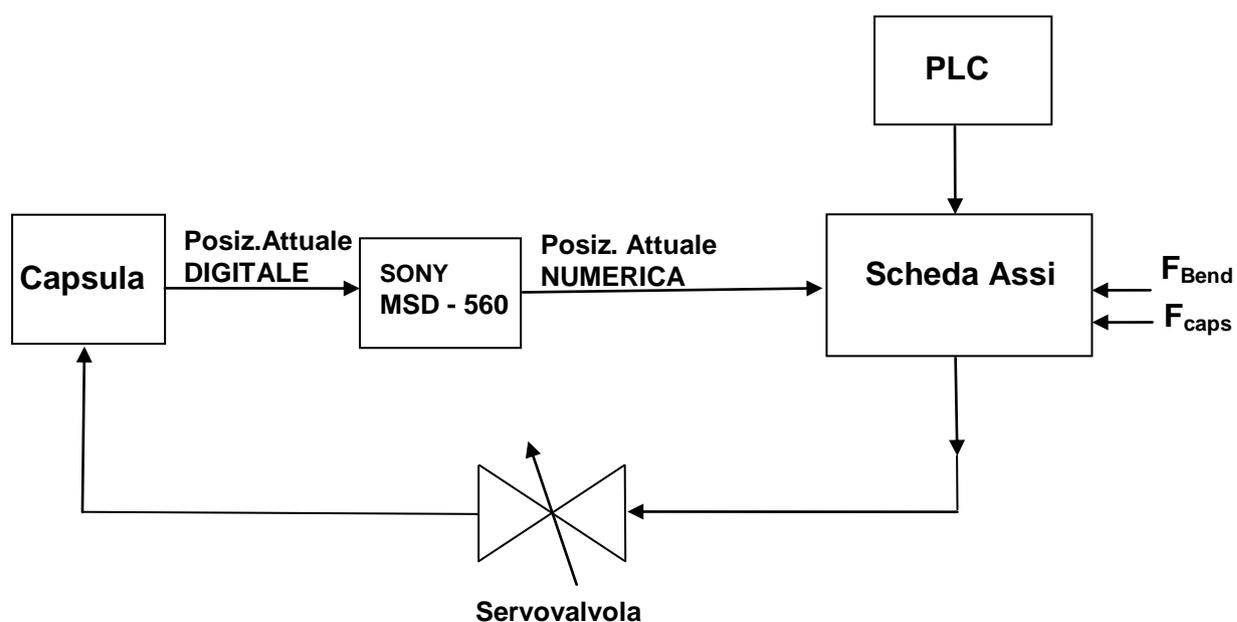


Figura 3.3: Schema funzionamento scheda ASSI

I set di posizione sono effettuati con rampa, le correzioni di posizione sono attuate ad asse “vivo” senza rampa. Il tempo totale di ciclo per il controllo degli assi è di circa 2-3 ms.

L’anello di regolazione di posizione è di tipo PID con possibilità di variare “on line” da bus dati o da linea seriale i singoli parametri di guadagno in modo indipendente.

Il guadagno proporzionale è inoltre variato automaticamente in funzione della caduta di pressione ai capi della servovalvola e quindi in funzione del segno dell’errore.

La funzione, corretta del fattore di guadagno, è realizzata tramite due tabelle, selezionate in base al segno dell’errore di posizione, i cui valori sono interpolati dal controllo in funzione della pressione rilevata dal trasduttore di pressione della camera inferiore.

Il sistema può attuare un disallineamento tra le due capsule (livellamento compensativo) in modo da lasciare inalterata la posizione media del cilindro inferiore; tale disallineamento può essere necessario per compensare eventuali sciabolature sul laminato in uscita dalla gabbia.

Lo scambio dati tra la scheda Assi e il PLC avviene tramite un protocollo di comunicazione seriale sul backplane.

Su questa linea vengono trasmessi:

- dati di set-up dell’unità
- selezioni di funzionamento dell’unità
- segnali di riferimento e correzione
- preallarmi – allarmi
- valori delle grandezze sotto controllo.

3.2 AGC DEL SISTEMA ATTUALE

Il sistema di controllo si basa sul seguente principio, considerando la gabbia come un sistema elastico e schematizzando il laminato con una caratteristica equivalente di resistenza alla deformazione.

La correlazione tra spessore di ingresso, spessore di uscita e forza di laminazione (**vedi figura 3.6c**) è rappresentabile con una curva che è determinata dalle caratteristiche del materiale laminato.

Con nastri di uguale materiale, ma diverso spessore in ingresso alla gabbia, si hanno diverse curve tra loro parallele nel diagramma forza – spessore (**vedi Fig. 3.6a**).

La luce tra i cilindri di lavoro della gabbia di laminazione, soggetta ad una forza di separazione F , varia secondo una curva il cui punto iniziale è rappresentato dalla luce della gabbia senza materiale; funzione crescente all'aumentare della forza.

Per le forze normalmente generate in laminazione si lavora in una zona della curva assimilabile ad una retta la cui pendenza è denominata "Mill Modulus" e la cui intersezione con l'asse delle ascisse è denominata S_o .

Allora:

$$H_{out} = S_o + \frac{F}{M}$$

- dove:
- H_{out} è lo spessore di uscita
 - S_o è la luce equivalente a forza zero
 - F è la forza di laminazione
 - M è il modulo elastico della gabbia

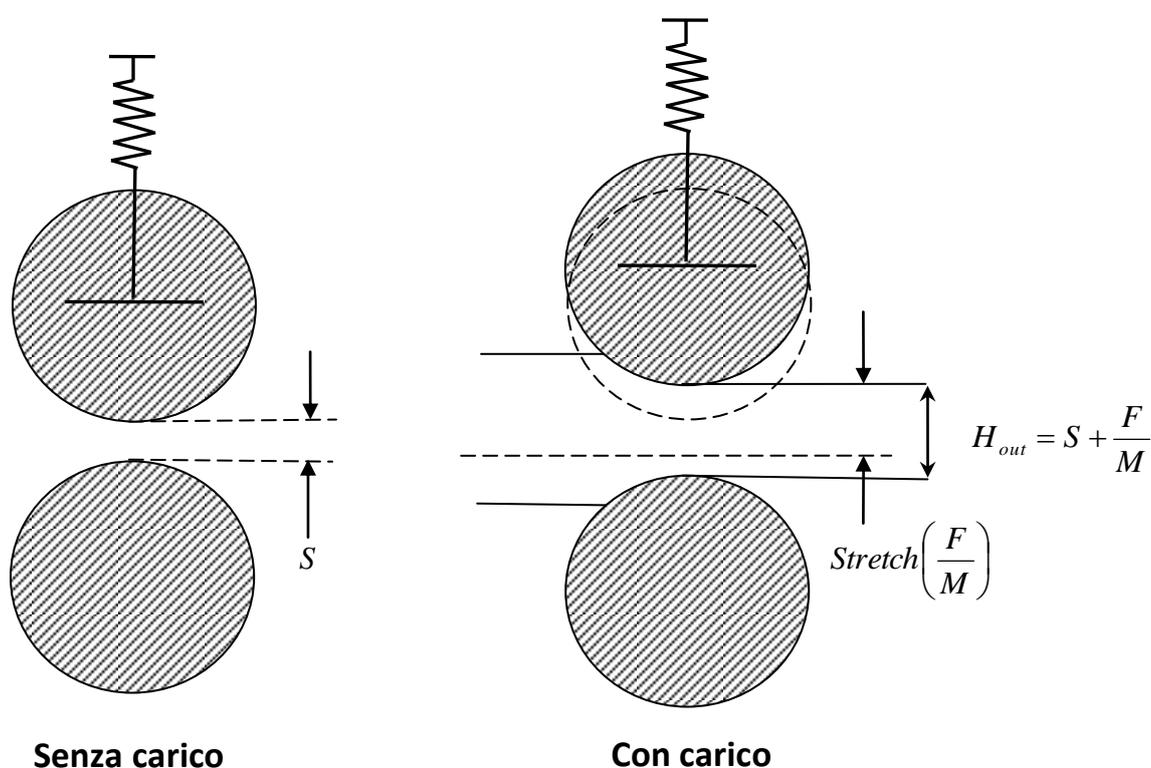


Figura 3.4: gabbia senza carico e con carico (Stretch)

Variando la luce tra i cilindri, agendo dunque sui vitoni elettromeccanici o sulle capsule idrauliche, si ottengono diverse rette tra loro parallele.

In laminazione, pertanto, si ottiene uno spessore del laminato in uscita (H_{out}) derivante dall'intersezione delle curve del laminatoio e della deformazione plastica del materiale (**vedi Figura 3.6b**), determinate dalla posizione dei cilindri e dallo spessore in ingresso del materiale stesso.

All'imbocco del laminato il sistema memorizza la posizione delle capsule e la forza di laminazione calcolando, con la formula precedente, lo spessore di uscita che viene memorizzato e costituisce lo spessore di riferimento per tutta la laminazione del pezzo.

Se durante la laminazione si verifica una variazione dello spessore in ingresso, ne consegue una variazione della forza di laminazione F , che determina una variazione dello spessore in uscita H_{out} (**vedi Figura 3.5**).

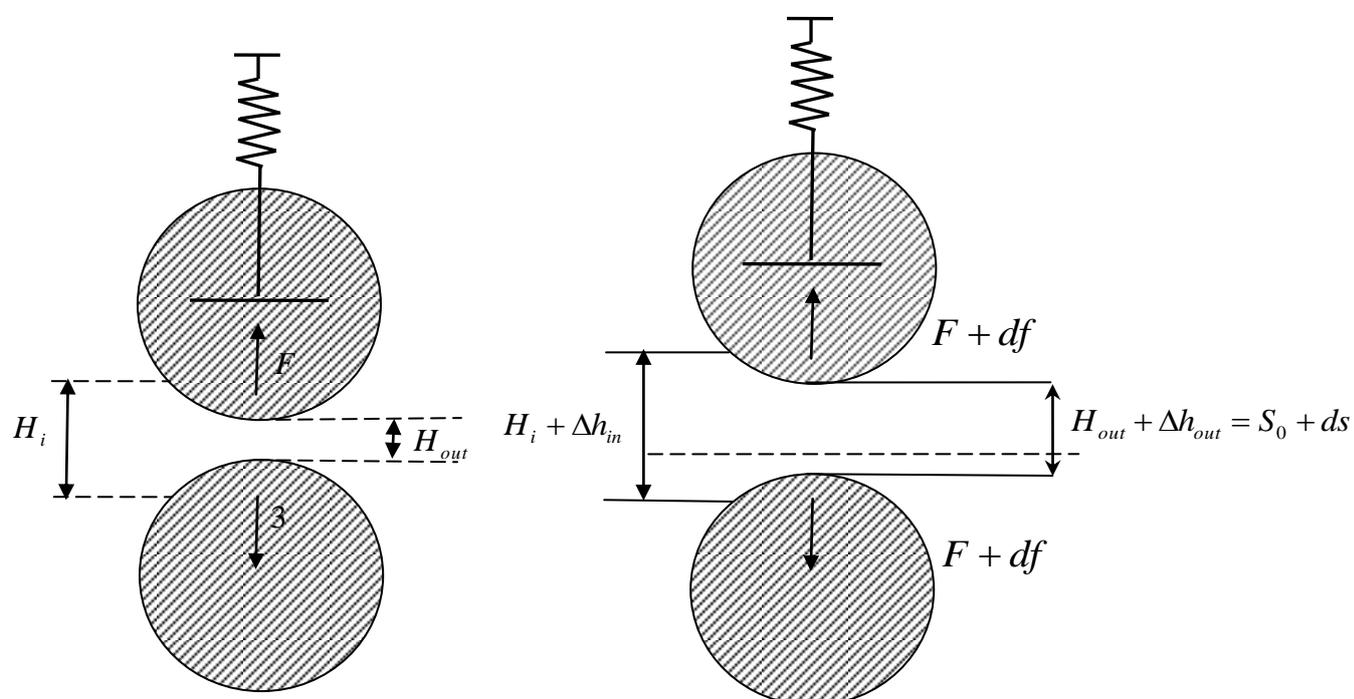


Figura 3.5: variazione dello spessore del laminato in uscita H_{out}

Variando la luce dei cilindri, ossia passando alla curva con valore iniziale S_{01} , è possibile ottenere una nuova forza di laminazione F_1 , e conseguentemente una riduzione di errore dello spessore in uscita.

Il sistema di controllo pertanto interviene modificando il riferimento di posizione delle capsule idrauliche in modo da ridurre l'errore di spessore in uscita.

La variazione di posizione delle capsule viene calcolata in funzione del modulo elastico M della gabbia.

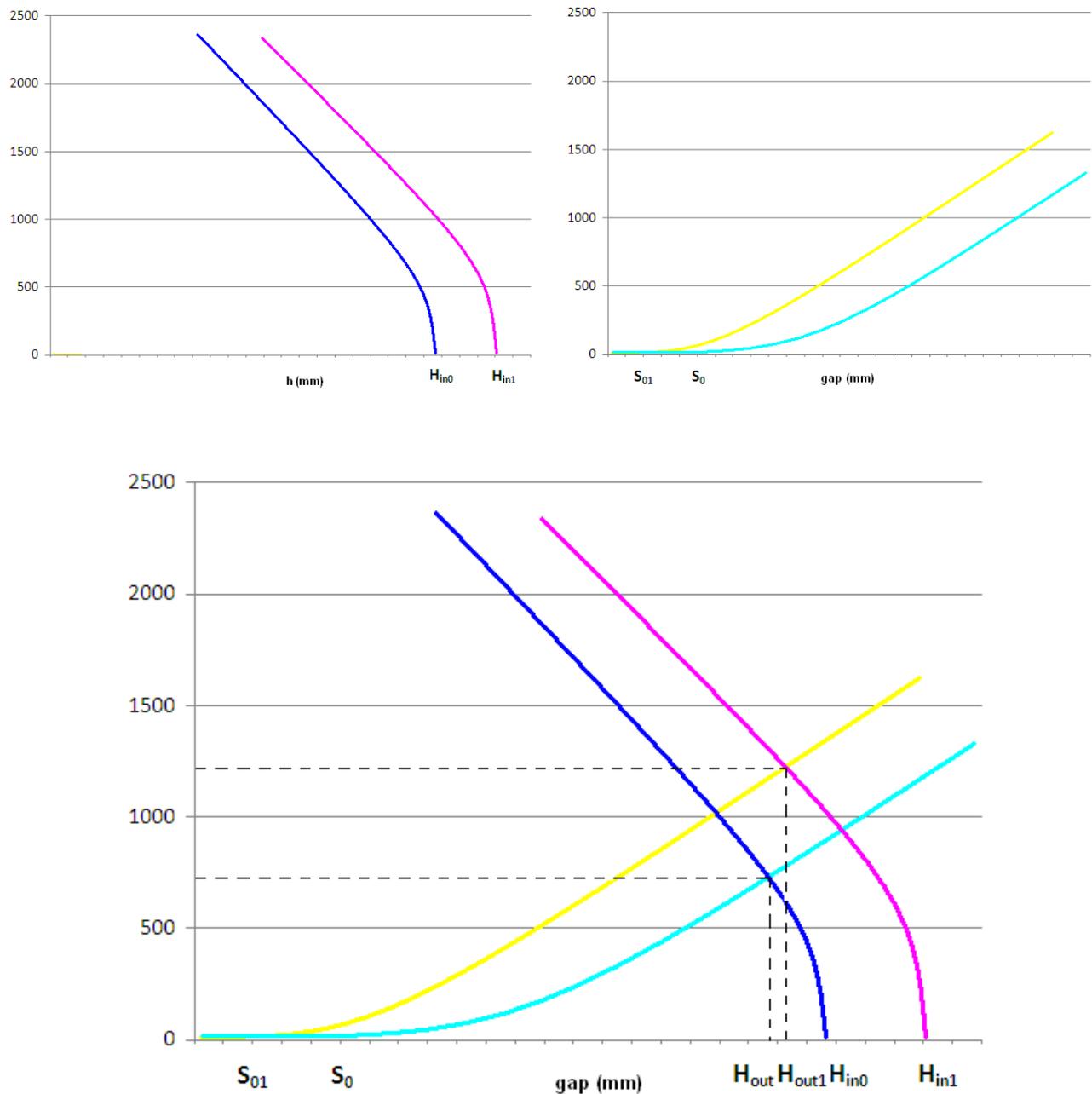


Figura 3.6: (a) diagramma forza-spessore; (b) diagramma forza-gap; (c) correlazione tra spessore di ingresso, spessore di uscita e forza di laminazione

La curva plastica del materiale, oltre che dalla riduzione di spessore, dipende anche dai seguenti fattori:

- composizione del materiale
- larghezza del laminato
- temperatura del laminato

- tiro in entrata ed uscita
- coefficiente di attrito tra laminato e cilindri di lavoro
- velocità di laminazione

Per la correzione della variazione di spessore il controllo calcola la forza di separazione in laminazione attraverso la rilevazione delle pressioni nelle due camere dei cilindri idraulici.

Variazioni della forza determinate da:

- **roll - bending;**
- **velocità di laminazione;**
- **tiro – aspo;**

influiscono sulla elaborazione del valore dello spessore sotto gabbia e conseguentemente sulle prestazioni del sistema di controllo di spessore.

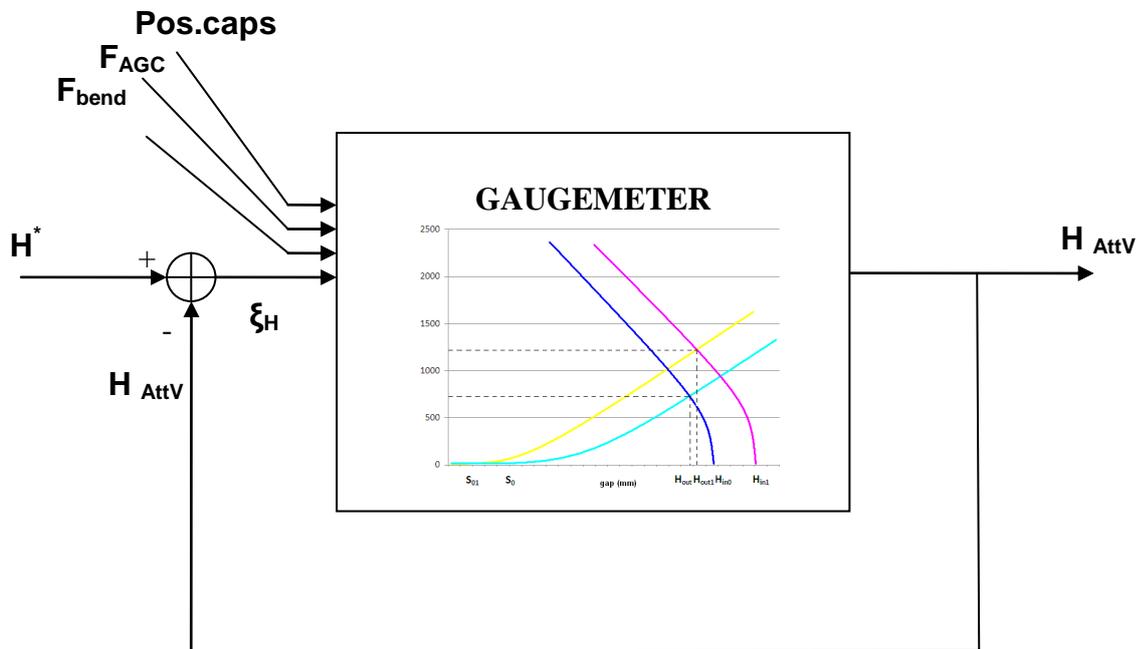
Per annullare o correggere parzialmente alcuni di questi effetti nel sistema Gagemeter sono implementate le seguenti funzioni:

- Compensazione dell'effetto della forza di contour;
- Compensazione della variazione di spessore del laminato in funzione della velocità di laminazione

Il controllo Gagemeter garantisce il mantenimento, negli opportuni limiti di tolleranza, dello spessore in uscita dalla gabbia assumendo come valore di riferimento di spessore quello effettivamente riscontrato sulla testa del laminato.

Il raggiungimento del valore nominale di spessore è pertanto determinato dal set del laminatoio, cioè dalla corretta definizione della scheda di laminazione.

Il sistema di controllo Gagemeter trasmette al sistema di supervisione durante ogni passata di laminazione i segnali di forza di laminazione e di spessore in uscita calcolato, per consentire l'eventuale adeguamento della scheda di laminazione.



$$H_{AttV} = P_{Att} + \left[\frac{X_{rel1} + X_{rel2}}{2} + E_{vel} + X_{BIN} + E_{fle} \right] \cdot NAG$$

Dove:

$$P_{Att} = \frac{(P_{Vit1} + P_{Vit2})}{2} : \text{posizione attuale media dei vitoni (vedi Figura 3.7)}$$

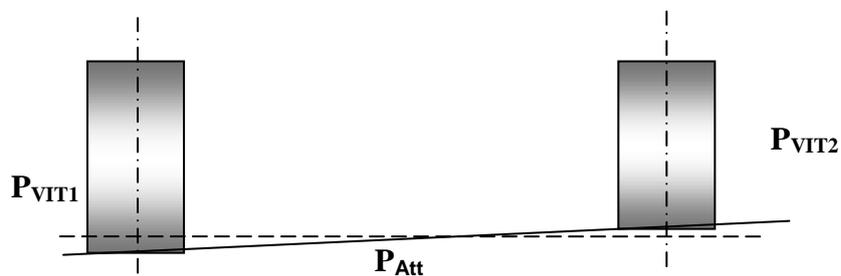


Figura 3.7: posizione attuale media dei vitoni

$$X_{rel1} = X_{Att1} - X_{Azz1} \quad \text{e} \quad X_{rel2} = X_{Att2} - X_{Azz2}$$

sono le posizioni relative delle capsule rispetto alle posizioni di azzeramento.

La procedura di azzeramento del sistema di misura della posizione delle due capsule è effettuata su comando PLC; tale operazione si rende necessaria per far sì che, applicando una forza di 800 tonnellate il sistema gabbia (vitoni, cilindri di lavoro e cilindri di sostegno e capsule) recuperi tutti i possibili giochi meccanici introdotti dai cuscinetti delle guarniture.

$$E_{vel} = f(v_{lam}, F_{ATTM}, K_{MAT})^1$$

è la variazione di spessore introdotta dall'errore sulla velocità istantanea rispetto alla velocità di laminazione impostata, che dipende, inoltre, dalla forza attuale media di laminazione e dalla costante elastica del materiale.

$$X_{BIN} = f(F_{Bending})^2$$

è la variazione di spessore introdotta dalla forza del bending;

$$E_{fle} = f(F_{ATTM}, W_{ATTM}, F_{Bending}, conf.meccanica)^3$$

è la variazione di spessore introdotta dalla flessione dei cilindri di lavoro/sostegno in funzione della forza attuale media di laminazione, larghezza del materiale, forza del bending e della configurazione meccanica (diametri dei cilindri).

NAG :volume del Gaugemeter (coefficiente moltiplicativo, determinato sperimentalmente, che tiene conto delle aree di contatto cilindri/laminato, fissato in 0,8 nel PLC attuale)

La correzione di posizione sulle due capsule al fine di ottenere H_{AttV} vale:

$$\varepsilon_{H1} = R_{corr1} = R_{corr} - \frac{L_{comp}}{2} \quad \varepsilon_{H2} = R_{corr2} = R_{corr} + \frac{L_{comp}}{2}$$

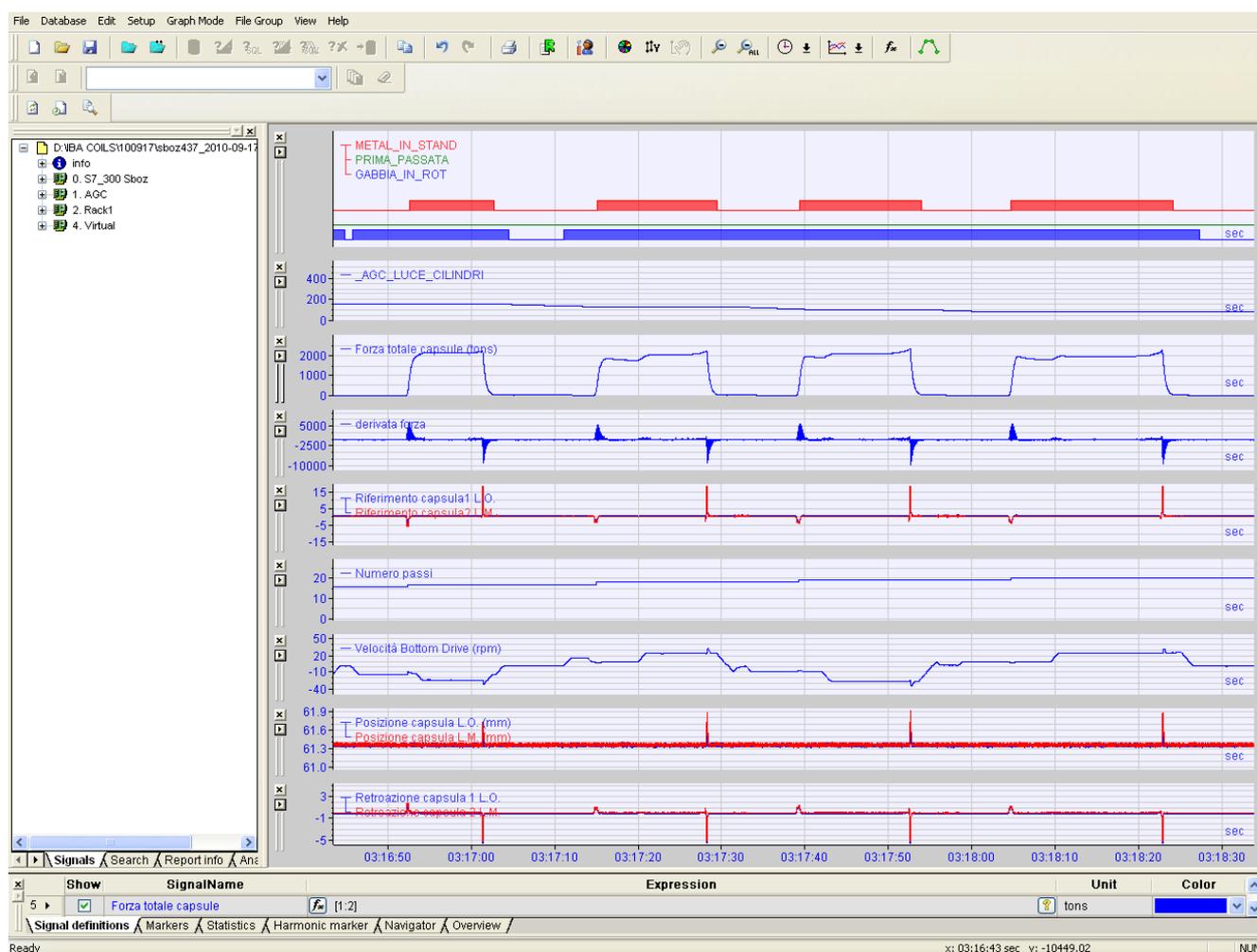
^{1,2,3} Si rimanda all'appendice per le formule dettagliate

$\frac{L_{comp}}{2} (\mu m)$: tiene conto della eventuale differenza di posizione delle due capsule dovute alle diverse elasticità delle due spalle della gabbia.

3.3 IBA

L'analisi dinamica delle grandezze fisiche viene realizzata attraverso l'utilizzo di uno strumento software (**IBA**) che si interfaccia tramite opportuni moduli al sistema di regolazione; esso consente di rappresentare mediante opportuni grafici il comportamento dei vari parametri che caratterizzano il controllo automatico di spessore.

Vediamo qui alcuni esempi:



La **figura 3.8(a)** mostra l'andamento delle pressioni e delle posizioni dei vitoni/capsule lungo una serie di passi di laminazione; la velocità del bottom drive passa alternativamente da positiva a

negativa poiché, essendo il nostro un laminatoio reversibile, il materiale transita in entrambe le direzioni.

Si nota pertanto come la luce tra i cilindri decresce ad ogni passo di laminazione, a causa del movimento dei vitoni.

La **figura 3.8(b)** descrive l'andamento tipico delle pressioni e delle posizioni in un singolo passo.

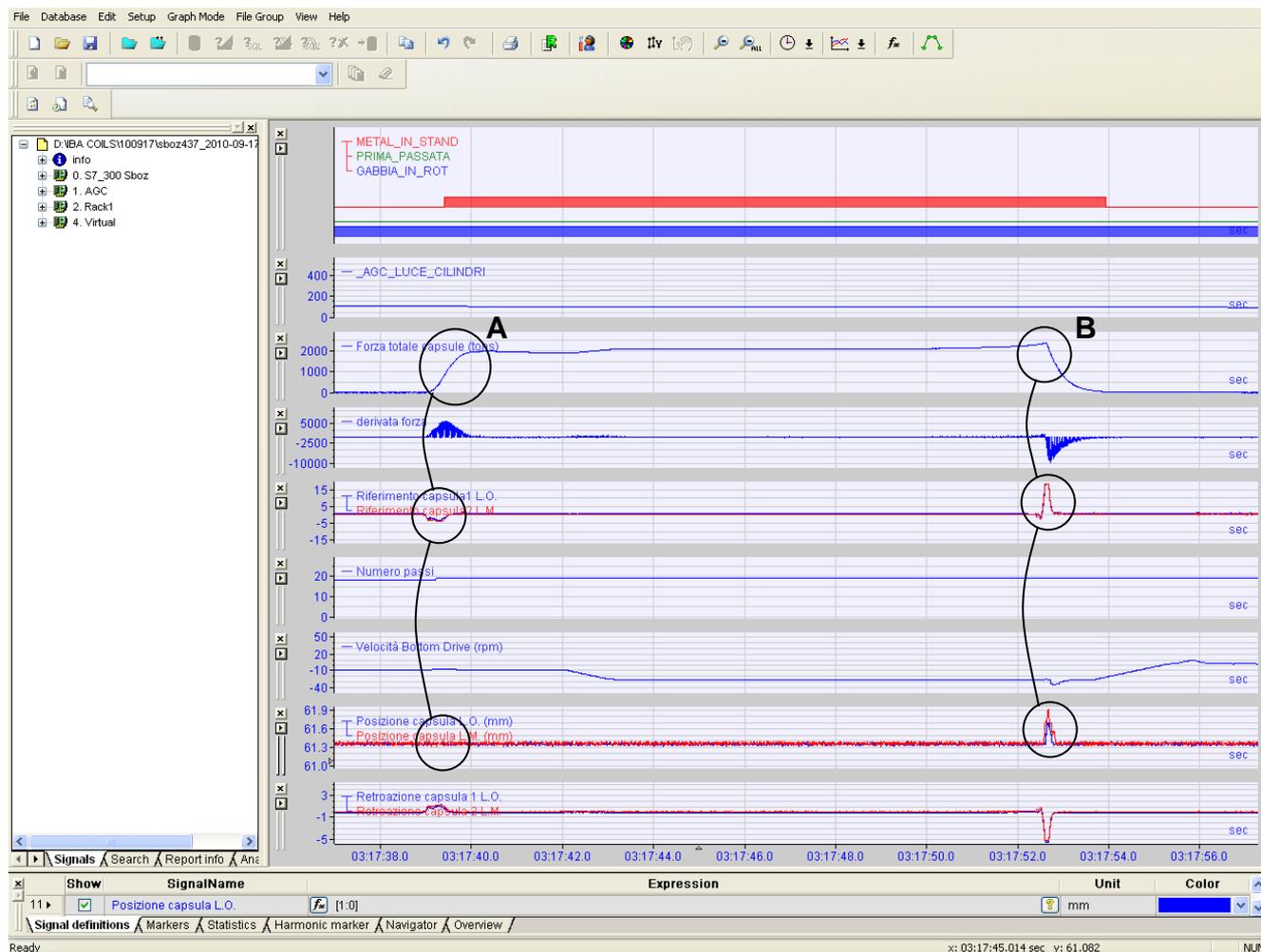


Figura 3.8: (a) andamento dei vari parametri lungo una serie di passi di laminazione;
(b) andamento dei vari parametri in un singolo passo di laminazione

La forza totale delle capsule si mantiene all'incirca costante; tuttavia, alla presa di carico (A) si genera una perturbazione nell'equilibrio del sistema che causa l'allungamento della gabbia secondo il modello elastico (stretch) e una compressione delle capsule idrauliche verso il basso; l'effetto netto è quello di allontanare i cilindri di laminazione dalla posizione nominale, variando di conseguenza lo spessore del materiale in uscita dalla gabbia. Il sistema reagisce comandando le

servovalvole delle capsule al fine di ripristinare la posizione originale tenendo conto anche della deformazione elastica della gabbia. Lo stesso comportamento si può notare alla perdita di carico (**B**): cessato l'effetto elastico di deformazione della gabbia e la forza di contrasto alle capsule, i cilindri di lavoro tendono a riavvicinarsi, per cui il sistema comanda le servovalvole al fine di riportare la posizione di passline originale.

Il riferimento di pilotaggio delle servovalvole risulta essere più marcato nella fase di perdita di carico perché in quel caso la capsula idraulica si espande senza avere resistenza, mentre nella fase di presa di carico la camera idraulica della capsula viene compressa con un effetto sulla variazione di posizione molto minore.

Supponendo uno spessore del laminato entrante pressoché costante, al termine di ogni fase transitoria, il sistema, rilevando una forza di carico costante, mantiene una posizione delle capsule costanti; se viceversa, lo spessore entrante risulta molto variabile si genera una variazione di pressione (che fa spostare la deformazione elastica lungo la curva) compensata dalla modifica della posizione delle capsule al fine di mantenere costante la luce tra i cilindri.

3.4 BENDING DEL SISTEMA ATTUALE

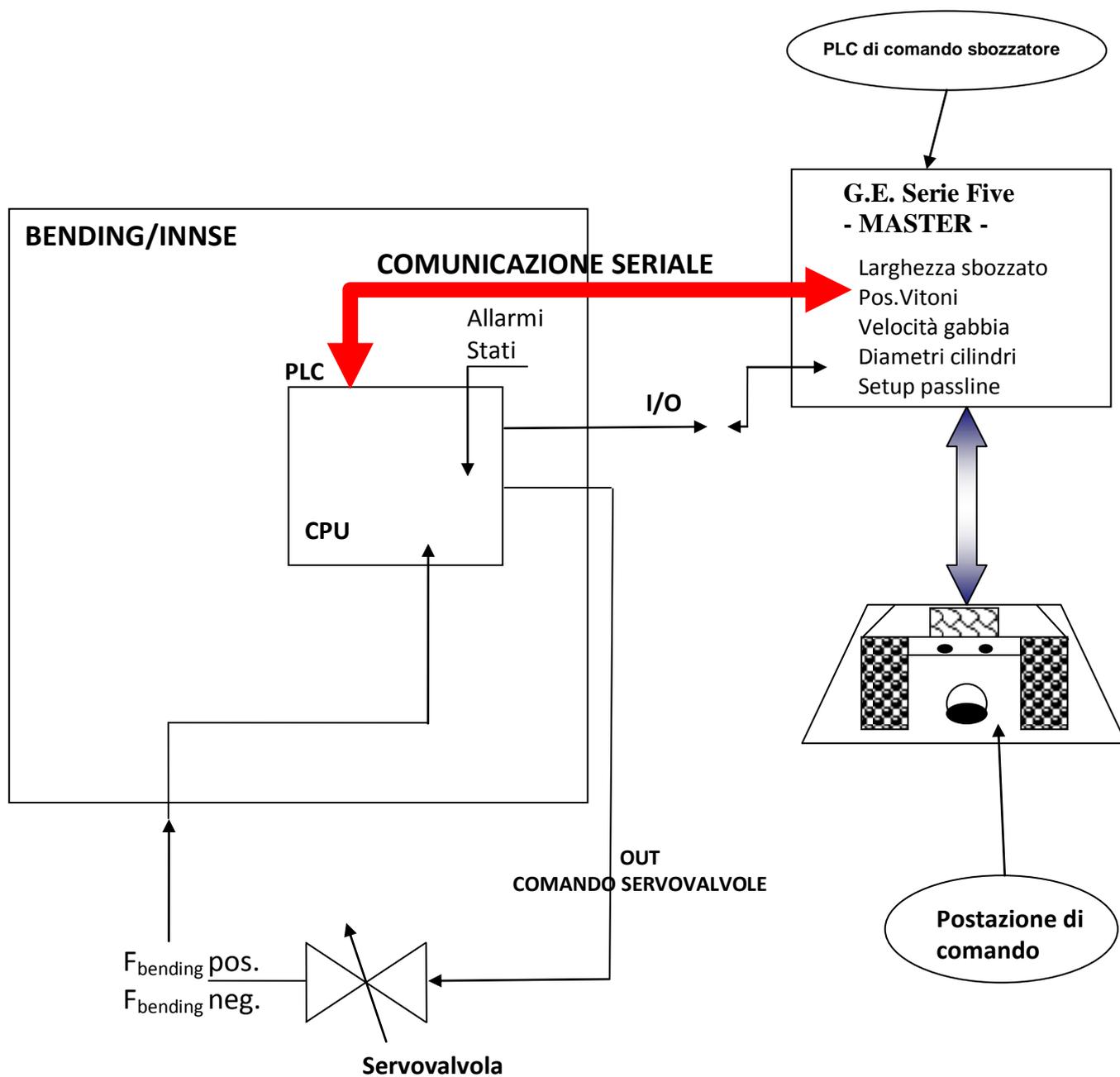


Figura 3.9: Collegamenti del sistema AGC con PLC sbozzatore

Capitolo 4

PROGETTO DEL NUOVO SISTEMA DI CONTROLLO

L'obiettivo è quello di introdurre un nuovo sistema di controllo che comporti un notevole miglioramento delle performance.

La realizzazione di tale sistema si è resa necessaria in particolare per la carenza di scorte della componentistica dell'attuale sistema di controllo.

Il nuovo sistema di controllo inoltre consente:

- il passaggio ad un'elettronica più moderna e quindi ad una maggiore reperibilità sul mercato;
- migliori performance in tempi di ciclo/PLC;
- una migliore diagnostica per i guasti attraverso la creazione di un pannello grafico che consente l'identificazione degli stati e degli allarmi;
- la possibilità di collegamento Ethernet ad un livello 2 di preset automatico;
- una netta riduzione della componentistica e quindi una riduzione della possibilità che si verifichino guasti.

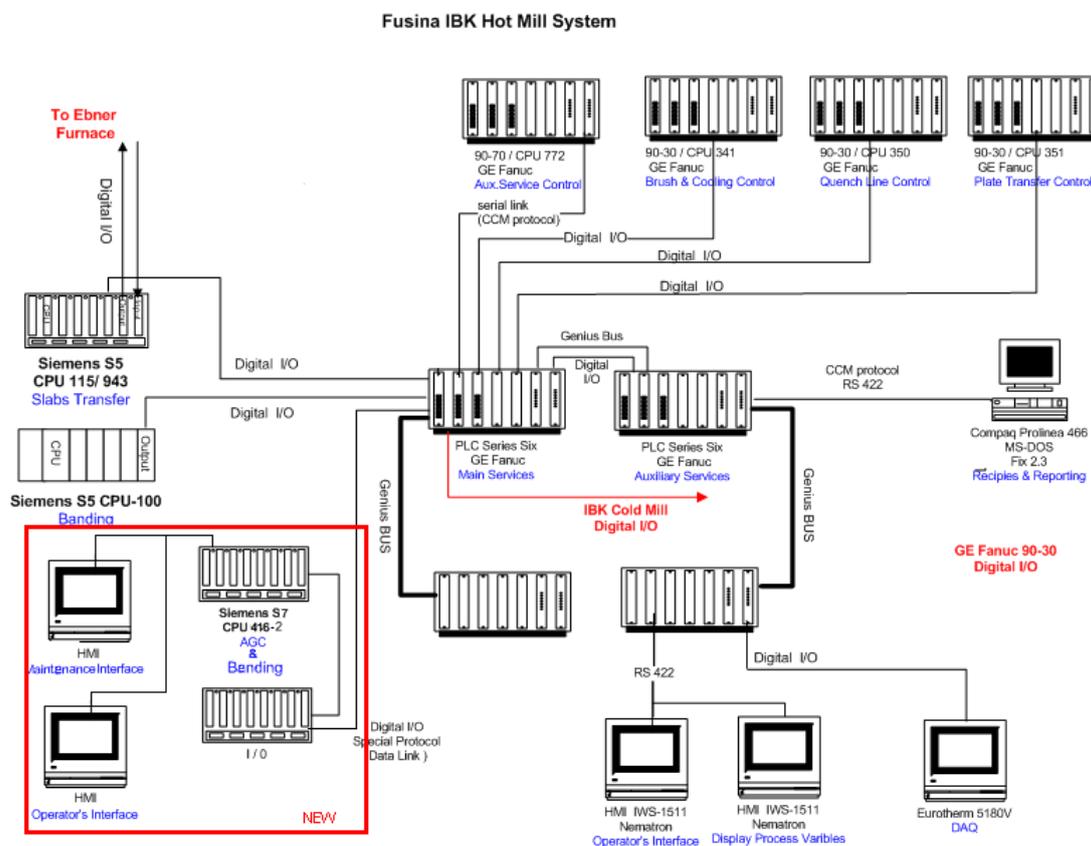


Figura 4.1: schema del nuovo sistema di controllo

4.1 COLLEGAMENTI AGC-BENDING NEL NUOVO SISTEMA DI CONTROLLO

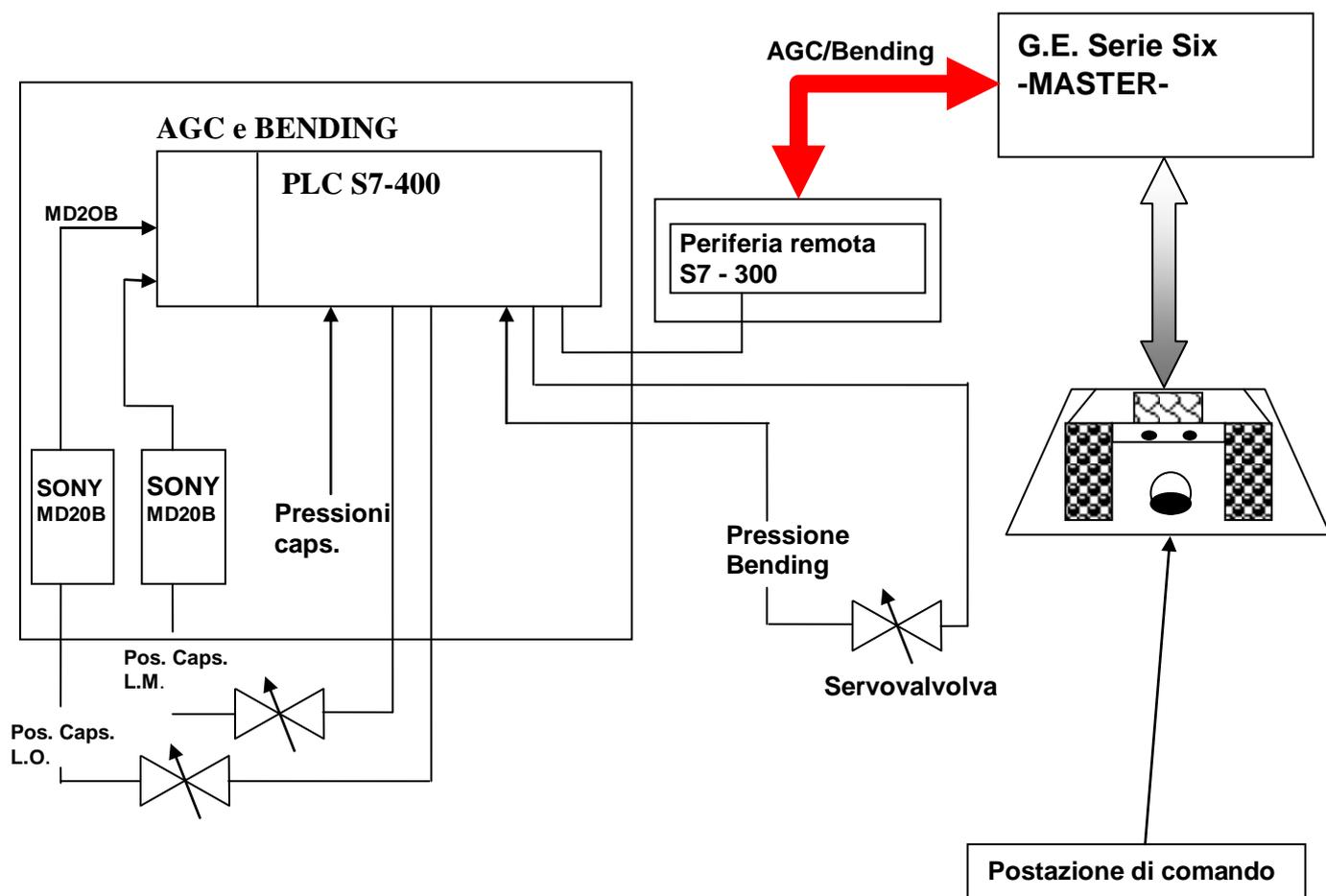


Figura 4.2: collegamenti del nuovo sistema **AGC-BENDING** con PLC sbozzatore

4.2 DURATA DEL PROGETTO

La durata del progetto dipende dall'approvazione R/A e dal rilascio del resoconto informativo del GRP Engineering per iniziare a realizzare il progetto.

La durata del progetto dipende anche dalle altre attività in cui è impegnato il GRP Engineering. Il numero di risorse in questa organizzazione è limitato e queste sono affidate dall'unità business. Le "posizioni" affidate per prime hanno priorità assoluta. Quelle affidate successivamente hanno priorità secondaria, ecc. Se succedesse un conflitto e alcune risorse dovessero richiedere un tempo maggiore l'unità business management dovrà dirigere le risorse e correggere la priorità.

Grp Engineering ha storicamente realizzato sistemi di controllo in "ombra" (shadow mode tesing). Uno o due "fuori servizio" sono programmati per connettere il sistema in parallelo con il controllo esistente. Tutti gli ingressi sono isolati dal campo per impedire indesiderate sovrascritture di qualche segnale. Una volta collegato, le operazioni di test e verifica possono succedersi senza interruzioni di produzione. Questo comporta un certo periodo di tempo in cui è possibile correggere il software e regolare il sistema senza rischi per la macchina o per il programma di produzione. Relè in commutazione sono utilizzati per disabilitare le uscite del vecchio sistema e abilitare quelle del nuovo.

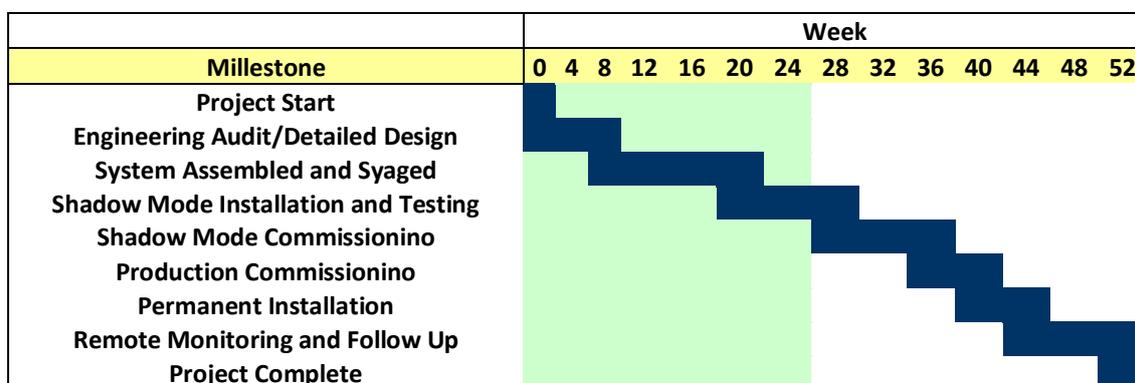


Figura 4.3: la tabella mostra la durata del progetto

4.3 SUSTAINING INVESTMENT E MIGLIORIE INTRODOTTE

Il progetto rappresenta un “**sustaining investment**”, significa cioè che è una spesa sostenuta al fine di porre lo Stabilimento al riparo da rotture irreparabili, e nel caso specifico, schede PLC obsolete e fuori mercato, che fermerebbero lo sbozzatore per un tempo indefinito (con chiare ricadute sulla produzione e occupazionali).

Le migliorie che comporterà questo nuovo progetto sono molte:

- curve di “mill stretching compensation” automatiche, e non statiche come ora, attivabili su richiesta del tecnologo di processo;
- il “tail tapering” ossia l’assottigliamento percentuale delle code per facilitare la laminazione al passo successivo;
- l’apertura alla rete ethernet di stabilimento, e tramite l’adozione di una CPU potente (S7-416) la possibilità di espandere il nuovo AGC/Bending anche al nuovo sistema di raffreddamento modulato;
- possibilità di collegare un insieme di applicazioni esterne (pirometri ottici e a contatto, interfaccia con il cicloconvertitore ABB, sistema di misurazione placca in ingresso, pese lordo/netto, AS400 “FLITS” aziendale, sistema di misura di spessore RX) per raccogliere un insieme di dati che verrà utilizzato dal “Livello 2” al fine di calcolare dinamicamente i passi di laminazione.

Quest’ultima attività, non possibile con l’attuale PLC G.E. serie six, permetterà di standardizzare le pratiche operative e migliorare la qualità del prodotto finito (in termini di spessore, planarità, allargamenti laterali, caratteristiche meccaniche) contenendo, entro limiti accettabili, la variabilità introdotta da operazioni manuali.

4.4 IL CONTRIBUTO DEL LAUREANDO AL PROGETTO

Innanzitutto bisogna precisare che effettivamente la maggior parte della realizzazione del progetto è stata affidata alla Ditta esterna (Alcoa ATC), alla quale è stato assegnato lo svolgimento del software e delle pagine di supervisione; tuttavia, la parte pratica di cablaggi, l'ingegneria e realizzazione del quadro sono a nostro carico.

In un primo tempo abbiamo preparato il campo, mediante la sostituzione dei morsetti preesistenti con i nuovi a due uscite della Phoenix. Questo permette di inviare i segnali elettrici su due punti distinti senza interferenze, per cui è possibile sviluppare il software di scambio dati Serie Six-S7 senza creare problemi di funzionamento all'impianto.



Nella seconda fase, abbiamo installato un PLC S7-300 (che diventerà in seguito una periferica remota del nuovo sistema) che si collega al PLC G.E. serie six tramite I/O digitali, per replicare lo scambio di informazioni esistenti con l'attuale AGC/Bending che dovranno essere sostituiti. Tale PLC ha inoltre un collegamento verso la rete Ethernet che permette di inviare dati al supervisore IBA; quest'ultimo permette di visualizzare in tempo reale l'effettiva correttezza dei dati letti/scritti tra i due sistemi.

In particolare, la sincronizzazione dei dati viene effettuata come nella figura seguente:

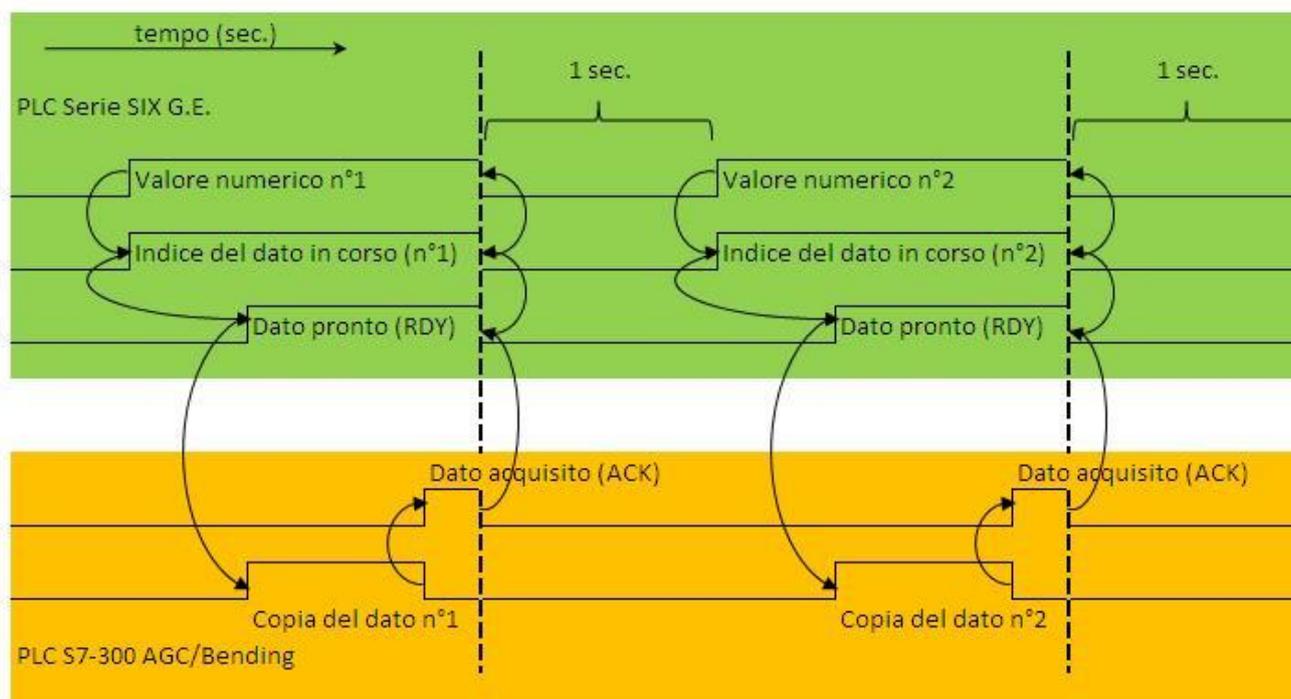


Figura 4.4: sincronizzazione dei dati

il PLC serie six prepara il dato numerico n°xx nei due byte di uscita QB60 e QB61 (che diventano i due byte di ingresso al PLC AGC EB100 e EB101), e l'indice del dato xx nel byte di uscita QB62 (che diventa il byte EB102 nel PLC AGC), dopodiché manda a 1 il bit Q63.0 (dato pronto, READY).

Il PLC AGC, che è sempre in ascolto per un dato disponibile dal serie six, rileva l'ingresso E103.0 e copia lo stato dei due byte EB100 e EB101 in un registro interno corrispondente al dato indicato nel byte EB102, dopodiché invia il segnale di "dato acquisito", ACKNOWLEDGE, ponendo a 1 il bit Q102.6.

A questo punto il PLC serie six azzerà i byte di dati e indirizzi e il bit RDY, e dopo un secondo riprende il ciclo per il dato successivo.

Questa sequenza ciclica si ripete su 11 step successivi, per la comunicazione di 11 variabili numeriche. In maniera analoga avviene lo scambio dati in direzione inversa, in cui ciclicamente il PLC AGC trasmette valori numerici al PLC serie six.

Vi sono poi, ovviamente, alcuni segnali digitali che vengono scambiati semplicemente tramite I/O.

Nella figura seguente viene riportato il blocco di programma per lo scambio dati:

```

FC13 : Protocollo parallelo AGC da Serie 6
Segmento 1 : Copia ingressi 104.0...105.7 su DB1.DEX46.0...47.7 per IBA
    L    EW  104
    T    DB1.DBW  46

Segmento 2 : N° del dato ricevuto (da 1 a 8)
    L    EW  101
    L    2#1111
    UW
    T    "Analisi".AGC_IN_NUM_DATO    DB1.DBW0    -- Codice del dato: 1...11

Segmento 3 : Titolo:
    L    "AGC_Byte1_in"                EB101    -- Protocollo Parallelo per AGC
    SLW  8
    L    "AGC_Byte0_in"                EB100    -- Protocollo Parallelo per AGC
    +I
    T    MW  202

Segmento 4 : Titolo:
    L    "Analisi".AGC_IN_NUM_DATO    DB1.DBW0    -- Codice del dato: 1...11
    SPL  aaa
    SPA  dat1
    SPA  dat2
    SPA  dat3
    SPA  dat4
    SPA  dat5
    SPA  dat6
    SPA  dat7
    SPA  dat8
    SPA  dat9
    SPA  dt10
    SPA  dt11
aaa: BE
dat1: L    MW  202
    T    "Analisi".AGC_DATO_01        DB1.DBD2
    SPA  end
dat2: L    MW  202
    T    "Analisi".AGC_DATO_02        DB1.DBD6
    SPA  end
dat3: L    MW  202
    T    "Analisi".POS_VITONE_L0      DB1.DBD10    -- Posiz. vitone L.O.
    SPA  end
dat4: L    MW  202
    T    "Analisi".POS_VITONE_LM      DB1.DBD14    -- Posiz. vitone L.M.
    SPA  end
dat5: L    MW  202
    T    "Analisi".LUCE_CILINDRI      DB1.DBD18    -- Luce cilindri
    SPA  end
dat6: L    MW  202
    T    "Analisi".LARCH_SBOZZ        DB1.DBD22    -- Larghezza sbizzato
    SPA  end
dat7: L    MW  202
    T    "Analisi".AGC_DATO_07        DB1.DBD26
    SPA  end
dat8: L    MW  202
    T    "Analisi".AGC_DATO_08        DB1.DBD30
    SPA  end
dat9: L    MW  202
    T    "Analisi".AGC_DATO_09        DB1.DBD34
    SPA  end
dt10: L    MW  202
    T    "Analisi".AGC_DATO_10        DB1.DBD38
    SPA  end
dt11: L    MW  202
    T    "Analisi".AGC_DATO_11        DB1.DBD42
    SPA  end
end: BE

```

Figura 4.5: blocco di programma per lo scambio dati

In particolare:

- segmento 1: copia degli ingressi digitali E104.0...E105.7 (EW104) sul registro DB1.DBW46 da trasmettere al sistema IBA (per diagnostica).
- segmento 2: decodifica del numero di dato in arrivo (il dato viene inviato su 4 bit consecutivi, e filtrato mediante l'istruzione AND-WORD (UW) sul binario 2#1111).
- segmento 3: copia dei due bytes EB101 e EB100 nella word di memoria MW202.
- segmento 4: smistamento del valore numerico MW202 nel registro opportuno in formato DOUBLE WORD (conversione automatica) DB1.DB2...DB1.DBD42.

Vi sono alcuni registri non utilizzati che potranno essere usati in futuro per lo scambio di ulteriori informazioni (dopo opportune modifiche del software su entrambi i sistemi).

- Nella parte rimanente di programma, questi ultimi valori verranno utilizzati nella logica dell'AGC per il calcolo dello spessore del laminato.

Parallelamente a queste attività, abbiamo proseguito con lo sviluppo degli schemi elettrici in Autocad per la realizzazione del nuovo quadro elettrico, conglobando le funzioni dei due quadri distinti esistenti, bending e AGC, in un unico quadro elettrico; dopo la validazione degli schemi da parte dell'ATC Alcoa abbiamo steso le specifiche per la costruzione del quadro. Lo scrivente ha partecipato agli incontri preliminari con le ditte esterne per l'affidamento della realizzazione del nuovo quadro, che è attualmente in costruzione presso l'impresa aggiudicante (consegna prevista entro fine dicembre 2010).

4.5 SPECIFICAZIONE DETTAGLI DEL NUOVO SISTEMA

Alcoa level 1 Control

ASC (Alcoa Stand Control)

Sistemi di controllo ad alta velocità sono richiesti per regolare le funzioni degli attuatori di base in una gabbia di laminazione includendo il controllo idraulico dello spessore dei cilindri (HGC) e la regolazione della pressione del Bending (RBC).

Sistema hardware

L'AGC opera attraverso un PLC Siemens S7. La risposta dinamica è garantita dall'utilizzo di un contatore ad alta velocità che fornisce il valore di ritorno della posizione e dall'utilizzo di un modulo analogico I/O ad alta velocità che ritorna il valore della pressione e il valore d'eccitazione delle servovalvole.

Tale sistema non include l'utilizzo di moduli amplificatori Moog. Questi strumenti convertono la tensione in uscita per scalare corrente e sono spesso utilizzati in controlli servo idraulici di sistema. Questi strumenti generalmente hanno molte funzionalità ma aggiungono hardware e costi e offrono piccoli benefici. GRP Engineering ha utilizzato questi amplificatori nel 1996 in Tennessee ma successivamente si è deciso di eliminarli a favore di un cavo diretto.

Sistema software

Tutto il software è scritto in Siemens SLC ed è organizzato in task. Per ogni durata di un task la priorità è stabilire un determinato periodo di tempo per il controllo ad alta velocità in anello chiuso. Il controllo delle servovalvole è dato dal livello più alto di priorità con il tempo di ciclo più veloce. I controlli più lenti sono dati dal livello successivo di priorità. Logica, difetti monitorati, ordine fanno parte della più bassa priorità.

Tutti i controlli software sono realizzati dall'Alcoa. Esso può essere modificato in base alle necessità degli ingegneri di Fusina. Il software è disponibile per l'uso e per la distribuzione interna all'Alcoa, ma non può essere venduto o utilizzato da nessun esterno.

Hydraulic Gap Control (HGC)

La posizione e la regolazione di carico saranno ottimizzate con gli appropriati allacciamenti e le dovute precauzioni per garantire sicurezza ed affidabilità del controllo idraulico dei cilindri. Il controller s'interfacerà attraverso i già esistenti sensori di posizione Sony Magnescale, trasduttori di pressione e servovalvole idrauliche. C'è un Sony Magnescale per cilindro, montato nel centro del cilindro stesso. I Sony Magnescale s'interfaceranno con il nuovo amplificatore MD20B Sony. Questi amplificatori forniscono un impulso in quadratura, che viene letto da un contatore ad alta velocità nel PLC Siemens S7. Questo contatore è in grado di leggere 2 ingressi. Le posizioni dei due cilindri sono confrontate per determinare il livello di sbandamento trasversale. Se questo valore oltrepassa un certo limite, il controllo genererà un allarme ed i cilindri si porteranno ad una posizione di sicurezza.

Il controller regolerà la posizione dei cilindri sotto carico e imporrà una certa flessione tramite il bending. La posizione relativa di azzeramento sarà stabilita da un valore rappresentante lo stretch della gabbia relativo alla forza prodotta. L'operatore realizzerà l'azzeramento della gabbia attraverso una human machine interface (HMI). Trasduttori di pressione o celle di carico saranno monitorate per determinare lo stack force. In fase di diagnosi sotto carico il sistema esegue automaticamente la risposta ai test e caratterizza il dato per determinare se le servovalvole degradano nel tempo.

L'HGC accetterà anche correzioni introdotte dall'operatore. I cilindri riceveranno il livello di riferimento e si sposteranno di conseguenza. Tali correzioni trasversali devono avvenire entro limiti accettabili.

Roll Bend Control (RBC)

L'RBC regolerà il roll-bending dei cilindri utilizzando i trasduttori di pressione e le servovalvole idrauliche già esistenti.

Il valore di ritorno della pressione sarà letto attraverso un modulo in ingresso ad alta velocità che si trova nel PLC Siemens S7. Vi è la possibilità di conferire ai cilindri un bending positivo o negativo. Il roll-bending dei cilindri sarà sufficientemente pressurizzato per compensare la forza richiesta per supportare il rullo superiore di back-up ed i rulli di lavoro.

Data Tracking e Jogging

Il sistema s'interfaccerà con l'IBA, il quale provvederà a registrare i dati attraverso un link Profibus. Inoltre, le seguenti condizioni che potrebbero causare guasti sono individuati dal nuovo software di controllo:

- Allarme Sony Magnescale;
- Massima corsa cilindri AGC (Cylinder excessive stroke);
- Sbandamento Trasversale eccessivo (Stack excessive tilt);
- Massima forza su cilindri (Cylinder excessive force);
- Eccessiva forza su gabbia (Stack excessive force);
- Eccessiva forza differenziale (Excessive differential force).

Human Machine Interface

Saranno previste due HMI: la prima verrà posizionata sul podio di laminazione.

La seconda HMI sarà montata sul quadro elettrico. Esso avrà più video per uso ingegneristico e per la manutenzione, la messa a punto ed il mantenimento al livello 1 del sistema.

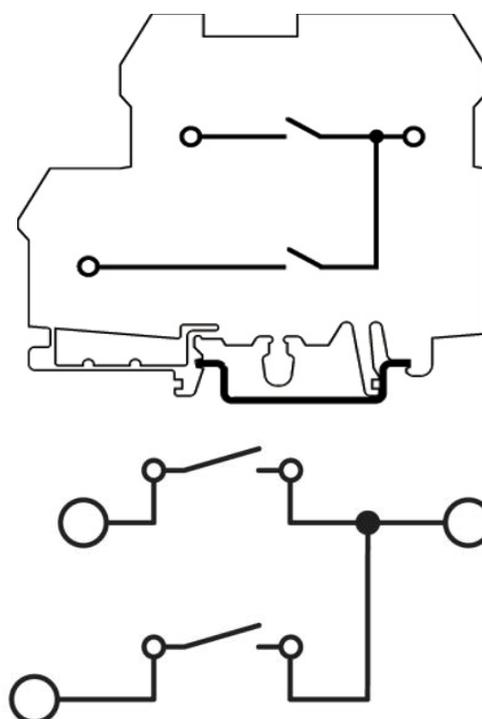
Il costo stimato include il pannello HMI ed il software utilizzato da GRP Engineering per la conversione e test delle schermate.

Communication Links

La comunicazione con il PLC di gestione dello sbozzatore sarà assicurata dalla unità remota, tramite protocollo parallelo (PIO); in futuro, quando l'hardware del PLC sbozzatore sarà sostituito, questa comunicazione verrà sostituita da un Profibus diretto.

Testing e Commissioning

Tutti gli I/O sono cablati utilizzando appositi morsetti che permettono di deviare il segnale al terminale 1 o 2 agendo sugli interruttori. Questo permetterà di passare velocemente dal sistema di controllo esistente al nuovo. Saranno necessarie piccole fermate dell'impianto per mettere a punto i regolatori ad anello chiuso e testare la sequenza di azzeramento. Questo consentirà di correggere la sequenza normale in "ombra" (shadow mode testing).



Costi di implementazione

I costi sono stati stimati basandosi su lavori già implementati di questa tecnologia dalla GRP Engineering in altre località.

I progetti passati rappresentano una base su cui fare riferimento per le spese attuali.

Fusina dovrà effettuare spese solo per attrezzature, manodopera e viaggi. I costi per la realizzazione del nuovo sistema saranno definiti con il Project Manager di Fusina.

Naturalmente all'interno dei costi devono essere considerati anche quelli per imprevisti.

Il costo che GRP (Global Rolled Product) Engineering caricherà allo stabilimento di Fusina riguarderà solamente le spese sostenute per le trasferte dei tecnici in fase di "commissioning". I costi per il progetto ed il software sono già coperti a livello corporate Alcoa.

Fusina dovrà provvedere alle spese di fornitura materiali ed installazione.

Quindi vi sono due spese da considerare. La prima corrisponde al progetto totale come descritto in precedenza. La seconda comprende i costi interni all'Alcoa e quelli esterni a Fusina. Se il tempo impiegato da GRP Engineering sarà incluso o meno nel costo stimato RFA dev'essere stabilito dalla FRP Europe & Fusina Operations management.

Capitolo 5

CONCLUSIONI

Lo studio per il progetto del nuovo sistema è in corso e per diversi motivi: tempi lunghi, ritardi dei fornitori, ecc. La sua completa realizzazione non è stata soddisfatta durante la permanenza dello scrivente in Alcoa Trasformazioni, tuttavia tale sistema è già presente nel laminatoio a freddo e questo è ciò che si vuole realizzare anche nel laminatoio a caldo:

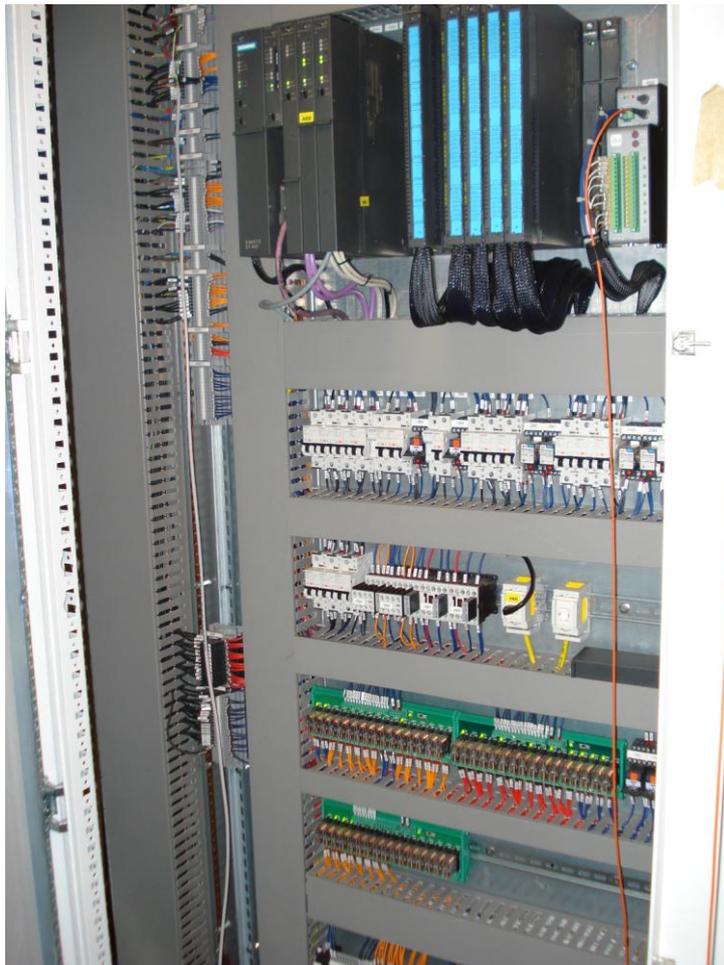


Figura 5.1: nuovo sistema di controllo (AGC-Bending)

APPENDICE

Di seguito sono riportate in dettaglio le formule per calcolare le componenti di errore che contribuiscono alla formula del gaugemeter **(si veda paragrafo 3.2)**.

$$E_{vel} = (A_{Ovel} - A_{lvel} \cdot 2 \cdot F_{ATTM}) \cdot v_{lam}$$

$$E_{vel} = \left\{ A_{Ovel} - A_{lvel} \cdot 2 \cdot \left[\left(\frac{F_1 + F_{ATTR}}{2} \right) + \left(\frac{F_2 + F_{ATTR}}{2} \right) \right] \right\} \cdot v_{lam}$$

Dove:

$$F_{ATTR} = [R_{cor} - (P_{ATTM}(K-1) - P_{ATTM}(K))] \cdot K_{ATTR}$$

$$P_{ATTM}(K) = \frac{P_{ATT1}(K) + P_{ATT2}(K)}{2}$$

$$\begin{aligned} R_{cor}(K) &= R_{cor}(K-1) + G_{gag} \cdot (H_{lok} - H_{ATT}) - A_{LFA} \cdot [R_{cor}(K-1) - (P_{ATTM}(K-1) - P_{ATTM}(K))] = \\ &= R_{cor}(K-1) + \left\{ A_{LFA} \cdot \left(1 + \frac{K_{MAT}}{M_{MOD}} \right) \right\} \cdot (\bar{H} - H_{ATT}) - A_{LFA} \cdot [R_{cor}(K-1) - (P_{ATTM}(K-1) - P_{ATTM}(K))] \end{aligned}$$

$$E_{fle} = [(K_{LA1} - K_{LA2} \cdot W_{ATT}) \cdot F_{ATTM} \cdot 2 + K_{LAB} \cdot (F_{BIN} - F_{BOUT})] \cdot 0,1 \cdot C_{DEFL}$$

Con:

$$C_{DEFL} = [1 + K_{BUF} \cdot (O_{BU1} - O_{BU10} + O_{BU2} - O_{BU20}) + 2 \cdot K_{WRF} \cdot (O_{WR} - O_{WR0})]$$

$$K_{LA1} = 0,5365 \left[\frac{\mu m}{T} \right]$$

$$K_{LA2} = 0,00013 \left[\frac{\mu m}{mm \cdot T} \right]$$

W_{ATT} : larghezza del laminato in mm

F_{BIN} : forza bending in Tonnellate

F_{BOUT} : forza bending in Tonnellate

$$K_{BUF} = -0,00127 \left[\frac{1}{mm} \right]$$

$$2 \cdot K_{WRF} = -0,0004 \left[\frac{1}{mm} \right]$$

O_{BU1} : diametro BKUP ROLL sup (mm)

O_{BU10} : minimo diametro ammesso [1305 mm]

O_{BU2} : diametro BKUP ROLL inf (mm)

O_{BU20} : minimo diametro ammesso [1305 mm]

O_{WR} : diametro WROLL (mm)

O_{WR0} : minimo diametro ammesso [890 mm]

Bibliografia

1. G. Reale, "Introduzione alla laminazione e all'estrusione dell'alluminio", 2009
2. M. Bisiacco e M.E. Valcher, "Controlli Automatici", Libreria Progetto, Padova, 2008
3. Alcoa GRP Engineering, "Flat rolled products process training course", USA
4. Alluminio e leghe, <http://www.aimnet.it>
5. Le leghe da deformazione plastica, <http://www.aluplanet.com>
6. Step 5 Versione 6.6 (MANUALE)
7. Technology Matters, <http://www.asiansaldo.com>