

Ing. P. Gianquinto, Dott. G. Camona, Ing. R. De Santis, Ing. G. Granata

Ansaldo Componenti

MESSA A PUNTO DI PROCEDIMENTI DI MANDRINATURA E SALDATURA PER GIUNZIONI TITANIO-TITANIO TUBO-PIASTRA TUBIERA PER CONDENSATORI DI CENTRALI TERMICHE DI POTENZA.

Riconoscimento

L'attività descritta nella presente nota è stata sviluppata nell'ambito di un accordo di cooperazione tra Ansaldo Componenti ed ENEA afferente al programma di promozione industriale dell'ENEA per lo Scambio Termico con parziale supporto finanziario dell'ENEA stesso, che si ringrazia per la cooperazione e l'autorizzazione alla pubblicazione.

Premessa

Il mantenimento di una adeguata tenuta al condensatore è una delle condizioni essenziali per minimizzare i rischi di corrosione nel ciclo.

Il condensatore è infatti il punto dell'impianto ove è possibile l'ingresso massiccio di inquinanti che poi si concentrano nelle parti critiche del ciclo (tubi bollitori di caldaia o generatori di vapore) dando luogo a danneggiamenti anche macroscopici. Nel caso di uso di acqua marina o salmastra, come fluido di raffreddamento, e in presenza di impianti ad alto investimento (es. caldaie di grande potenza o centrali nucleari) la tendenza tecnologica moderna è volta all'impiego di tubi in acciaio inossidabile alto legato (es. superferritici al Cromo tipo ELI) o all'uso di titanio che rappresenta la soluzione tecnologicamente di punta.

I condensatori sono oggi, per la più parte, realizzati con piastre tubiere e tubi in lega di rame con unione tubo-piastra

per sola mandrinatura. L'uso di tubi in acciaio inossidabile ferritico e/o austenitico è ancora poco comune quando il fluido refrigerante è acqua di mare; l'utilizzo del titanio è oggi estremamente limitato sia per ragioni tecniche che economiche.

La tecnologia moderna punta comunque alla realizzazione di condensatori ad elevata tenuta (tendenzialmente "zero Leakage") ciò in considerazione dei notevoli costi collegati alla fermata di grossi impianti di potenza.

Realizzare un condensatore ad alta tenuta richiede un insieme di misure che vanno dalla scelta di materiali altamente resistenti alla corrosione (acciai inossidabili speciali o titanio) alla realizzazione di giunti a perfetta tenuta (saldati e mandrinati) alla adeguata tecnologia realizzativa e di controllo.

Quando si scelgono tubi in titanio saldati alle piastre tubiere, le piastre possono essere in titanio massiccio od in acciaio al carbonio placcato con titanio.

La scelta tra queste due alternative dipende in genere da ragioni economiche e dall'adozione o meno di una giunzione saldata tra piastra tubiera ed involucro.

ACO ha riscontrato la necessità di acquisire una capacità realizzativa nella giunzione titanio-titanio per condensatori onde essere in grado di rispondere a pressanti esigenze di mercato.

A tale scopo è stato definito un programma di lavoro che attraverso ricerca bibliografica, ricognizione dello stato della tecnologia nazionale e adeguato programma sperimentale consentisse di giungere ad una prequalifica di procedimento e alla definizione di quanto necessario al trasferimento della tecnologia in produzione.

(Il materiale bibliografico disponibile sul tema della saldatura del titanio a titanio, anche per i condensatori, è molto vasto e di difficile ricognizione, trattandosi per lo più, di presentazioni di tipo commerciale).

Con riferimento alle operazioni previste dal ciclo di realizzazione ACO si riportano di seguito alcune conclusioni ricavate dall'esame della bibliografia e prese come riferimento per le successive attività:

Preparazione giunto tubo-piastra

Gli aspetti più rilevanti riguardano le operazioni di foratura ed il mantenimento di un adeguato livello di pulizia.

Per la foratura, dato il carattere fortemente duttile del materiale, occorre disporre di utensili con adeguata geometria che facilitino l'allontanamento del truciolo e un valido raffreddamento dell'utensile.

Per quanto attiene alla pulizia questa deve essere massima in previsione della successiva operazione di saldatura. Nelle zone da saldare lo sgrassaggio deve essere estremamente accurato e si dovrebbe evitare di toccare il metallo a mani nude.

Mandrinatura tubo-piastra.

E' essenziale considerare se l'operazione debba essere eseguita prima o dopo saldatura.

Nel caso essa venga eseguita prima della saldatura essa deve essere svolta a secco onde non apportare inquinanti.

Nel caso essa venga eseguita dopo saldatura è possibile procedere convenzionalmente con gli adatti lubrificanti.

Il titanio si caratterizza per un lento rilassamento dopo mandrinatura per cui può essere necessaria la ripetizione dell'operazione di mandrinatura.

Saldatura tubo-piastra.

L'ossidazione del titanio in aria inizia da temperature superiori a 180°C. L'intensità dell'ossidazione è indicata dal colore:

- giallo paglierino - debole ossidazione
- bleu - intensa ossidazione
- nero - bruciatura del materiale.

Di norma si accetta un colore delle saldature paglierino chiaro, il colore bleu non è accettato.

La protezione deve essere perciò totale su tutto il giunto, fino a che questo scende sotto i 180°C.

La tecnica di saldatura universalmente accettata è il TIG, con o senza metallo di apporto.

La protezione deve interessare anche l'interno del tubo per una lunghezza di almeno 2 cm; l'uso di argon ad elevata purezza (tipo UQ) è un requisito base.

La saldabilità del titanio è molto buona, per cui una volta risolto il problema ossidazione è piuttosto facile ottenere cordoni di bell'aspetto e ben penetrati.

L'elettrodo di tungsteno deve essere molto appuntito (15 gradi di apertura totale); la lunghezza d'arco deve aggirarsi attorno a 1 : 1,5 mm (arco corto); si deve saldare con elettrodo sulla piastra per evitare eccesso di fusione sul tubo.

L'attrezzatura è tipicamente quella a TIG orbitale senza metallo di apporto con adeguato sistema di alimentazione del gas di protezione.

L'esperienza nazionale di realizzazione "in campo" di grossi condensatori in titanio è obiettivamente carente e limitata all'esperienza ANSALDO per il CIRENE, che peraltro non rappresenta complessivamente il ciclo di realizzazione di un condensatore ad alta tenuta e di grandi dimensioni.

Presso i maggiori fabbricanti di apparecchi per l'industria petrolchimica esiste una diffusa esperienza per la realizzazione di scambiatori di calore con tubi in titanio di varie dimensioni.

2. DEFINIZIONE DEL PROGRAMMA SPERIMENTALE

Il programma sperimentale è stato definito con i seguenti scopi:

- a) rendere disponibile un set di documenti tecnici atti a servire come riferimento per la stesura di documenti

operativi di commessa relativa sia all'acquisto delle apparecchiature necessarie (mandrinatrici e saldatrici) sia all'esecuzione delle operazioni stesse, incluse le operazioni di controllo.

- b) consolidare un livello sufficiente di conoscenza in relazione a tutte le problematiche di realizzazione di condensatori in titanio.
- c) Giungere, compatibilmente al successo delle azioni di cui ai precedenti punti a) e b), ad una "prequalifica" del procedimento di saldatura con Ente Ispettivo Esterno.

2.1 DEFINIZIONE DEL CICLO DI LAVORO

Il ciclo su cui è stato impostato il programma sperimentale con lo scopo di verificarne l'applicabilità è stato il seguente:

- posizionamento del tubo (con riferimento ai problemi di movimentazione e mantenimento di un adeguato livello di pulizia);
- mandrinatura di accostamento;
- saldatura;
- mandrinatura di forza.

I parametri su cui approntare l'attrezzatura sperimentale sono stati così identificati:

- spessore piastra tubiera;
- spessore tubi;
- diametro dei tubi;
- preparazione di saldatura a raso e a tubo protuso (fig. 2.1A)

2.2 DEFINIZIONE DEI COUPONS DI PROVA

I coupons di prova sono stati definiti con lo scopo di rappresentare al massimo grado possibile le successive operazioni in fabbricazione e di fornire adeguata dimostrazione della qualità dei giunti ottenibili e dei problemi tecnologici collegati.

Infatti le preparazioni di fig. 2.1 rappresentano sia l'estremità del tubo su cui viene eseguita la prima giunzione, sia la seconda estremità dopo il taglio a misura.

Nella definizione dei coupons si è tenuto conto anche della disponibilità di materiali per le prove essendo, come noto, il titanio materiale di non facile reperibilità nella forma di semilavorato richiesta.

3. SPERIMENTAZIONE

La sperimentazione è stata volta ad indagare le principali operazioni in relazione alla possibilità, e alle modalità, per raggiungere determinati requisiti di specifica definiti da ACO sulla base dello "standard" richiesto dal mercato per prodotti di questo tipo.

3.1 FORATURA

La sperimentazione relativa alla foratura è stata intesa a:

3.1.1 Verificare il campo delle tolleranze ammesse, anche in vista dei risultati ottenibili nella successiva operazione di mandrinatura.

La dimensione di foratura di tutti i fori è stata pari a $25,65 \pm 0,05$ mm; per un numero limitato di fori questa dimensione è stata portata a $25,90 \pm 0,05$ mm onde simulare una situazione al limite estremo delle tolleranze ammesse dalle normative HEI/TEMA.

Non sono stati evidenziati particolari problemi nè di utensile nè di lubrificante di taglio.

3.1.2 Verificare il grado di rugosità ottenibile con i vari sistemi di lavorazione.

E' stata inizialmente prevista una rugosità di 1,6 Ra. Questo valore è risultato non ottenibile con una sola operazione sia con alesatore che con punta a cannone. Si è pertanto provveduto ad estendere il campo di accettabilità al valore di 3,2 Ra ampiamente ammesso della normativa.

3.2 ACCOSTAGGIO

L'operazione di accostaggio è necessaria per ridurre al minimo il "gap" tubo-foro prima della saldatura nel corso della saldatura stessa.

Sono state indagate varie soluzioni dalle più semplici alle più complesse: semplice accostamento con cuneo di legno e colpo di martello; puntatura di elettrodo; accostamento con mandrinatura a rullini; espansione idraulica con anello elastomerico.

La soluzione "cono di legno+martello", ancorchè di uso comune, non è stata considerata accettabile per una serie di ragioni come:

- non riproducibilità
- rischio di spostamento del tubo sotto il colpo (con vanificazione del precedente posizionamento)

La puntatura a elettrodo è risultata non accettabile per le seguenti ragioni:

- il punto di saldatura "richiama" il tubo in un solo punto lasciando un ampio "gap" variabile lungo tutta la circonferenza;
- il punto di saldatura rappresenta una discontinuità iniziale suscettibile di generare cricche locali;
- la successiva saldatura può essere fortemente influenzata dal "gap" iniziale variabile.

L'accostamento per mandrinatura meccanica è stato scartato perché provocava, quasi invariabilmente, un trascinamento rotativo del tubo senza assicurare un riproducibile grado di accostamento.

Alcune saldature eseguite dopo accostamento meccanico sono risultate difettose per soffiatura e disuniformità grave del cordone.

La presenza di tali difetti è stata attribuita a blocco della possibilità di fuga dei gas sul lato interno della saldatura per l'eccesso di aderenza realizzato.

Si è infine puntato alla realizzazione dell'accostamento con metodo di espansione di un anello elastomerico per pressione idraulica.

Questo sistema prevede (fig. 3.1) una testa che viene introdotta nel tubo comprendente un anello elastomerico, con lunghezza commisurata all'estensione da mandrinare, che viene espanso per trazione di un apposito stelo azionato da un pistone idraulico.

Con questo tipo di accostamento la successiva operazione di saldatura è risultata di agevole esecuzione, sempre esente da difetti.

Caratteristica precipua di questo metodo di accostamento è ovviamente, la ripetibilità.

3.3 SALDATURA

L'operazione di saldatura, eseguita senza metallo d'apporto, con macchina TIG A MATIC, non ha comportato, come atteso, particolari difficoltà fatta eccezione per i problemi di protezione dall'ossidazione della saldatura stessa.

Le attrezzature utilizzate sono state le seguenti:

- Generatore: Analog 300 Miller.
- Pistola: modo 112 RTA con calotta.
- Calotta di protezione.
- Centratore di tipo piano.

Operativamente è stato riscontrato che la posizione ottimale di inizio del ciclo saldatura, inizio cordone, deve essere sempre a ore 10; con partenza a ore 6 si è riscontrato il pericolo di difetti.

3. 4 MANDRINATURA DI FORZA

L'esecuzione di una mandrinatura di forza sulla giunzione tubo-piastra di un condensatore deriva dalla necessità di conferire al giunto resistenza meccanica (specificamente nei confronti dei problemi indotti dalla vibrazione), essendo la saldatura considerata solo come sigillo, ancorché la saldatura stessa possa dare un notevole contributo alla resistenza strutturale del giunto.

Il parametro di riferimento assunto è stato quello della riduzione di spessore del tubo nell'ordine del 12%.

In questa fase, il processo è apparso semplice e senza particolari problematiche.

In una fase successiva, in cui si è voluto eseguire una prova di "prequalifica", ovvero esecuzione di ciclo completo di operazioni secondo i parametri predeterminati, al termine dell'operazione di mandrinatura di forza si è verificato un parziale distacco del cordone di saldatura con evidenza di strappamento del cordone stesso.

A fronte di questo problema è stata riesaminata tutta la tecnologia di mandrinatura giungendo alla conclusione che il problema derivava essenzialmente da:

- azione di rulli del mandrino che andavano ad interessare anche la saldatura;
- presenza di azioni assiali derivanti dalla mandrinatura stessa.

Si è quindi provveduto ad acquisire un mandrino con rulli scaricati onde portare la zona di mandrinatura sufficientemente lontana dalla saldatura modificando anche le procedure operative.

3.5 CONTROLLI

Si è già avuto modo di osservare che il ciclo realizzativo previsto in cantiere è costituito da:

- posizionamento del tubo nel foro
- mandrinatura di accostamento
- eventuale lamatura
- saldatura
- mandrinatura di forza

Essendo elevatissimo il numero di giunzioni da realizzare nel condensatore (circa 45.000 per un condensatore di CTE da 350

MW) è evidente come la definizione di un adeguato livello e tipo di controllo, condizioni tempistica ed economicità di realizzazione.

I metodi di controllo previsti sono risultati riconducibili ai seguenti:

3.5.1 Visivo

3.5.2 Dimensionale (con dima, temponi e, in qualche caso, comparatori).

3.5.3 Liquidi Penetranti (essenzialmente per verificare la qualità della saldatura)

Tutti questi metodi sono di uso comune e non hanno costituito, anche nel corso della sperimentazione, rilevante problema.

3.6 RIPRODUCIBILITA' E RIPARAZIONI

3.6.1 Prove di riproducibilità

Definiti i parametri operativi si è proceduto ad una serie di prove di saldatura per valutare la riproducibilità del procedimento variando sia le condizioni geometriche del giunto (diametro del foro, spessore del tubo, livello di protrusione) che le caratteristiche elettriche della saldatura (essenzialmente la corrente) che, infine, il livello di mandrinatura (sino a valori molto elevati, attorno al 14%, dell'assottigliamento dello spessore di parete).

3.6.2 Prove di riparazione

Riparazioni della saldatura possono rendersi necessarie per:

3.6.2.1 Recupero qualitativo della saldatura ad esempio per eliminazione di soffiature o ricostituzione dell'estetica del cordone.

3.6.2.2 Rimozione dei difetti di penetrazione vuoti per eccesso (eccessiva dimensione del cordone) che per difetto (mancanza di saldatura).

E' stata equiparata alla riparazione l'operazione di tappatura di alcune posizioni che può rendersi necessaria sia in fase di montaggio che, più verosimilmente, in fase di esercizio.

Sono state indagate le seguenti tecniche di riparazione:

- Riparazione senza metallo d'apporto con metodo manuale.

Essa è stata applicata ad una mancanza di fusione relativa ad un lembo del tubo per un tratto di circa 5 mm

- Riparazione di un ipotetico difetto che prevedeva la rimozione del cordone. A tale scopo è stata eseguita una lamatura con fresa che è stata quindi riempita per rifusione, sempre senza metallo d'apporto.

Per ottenere il risultato richiesto si è dovuto andare ad elevati valori di corrente (circa 100 A) ed il cordone ottenuto è risultato molto svasato verso il interno.

- Asportazione della saldatura per una profondità di 1,5 mm su un diametro lievemente maggiore del diametro esterno del tubo sino a rendere possibile la rimozione del tubo stesso.

Questa operazione ha simulato l'operazione di sostituzione di un tubo.

La nuova saldatura eseguita con corrente pari a 100 A è stata eseguita senza problemi di sorta.

- Saldatura di inserto per simulare un'operazione di tappatura eseguita sempre senza metallo di apporto e corrente di 100 A.

Nel complesso è stato messo in luce che non esistono particolari problemi di riparazione e che le problematiche che si riscontrano non sono dissimili da quella già esaminate nella fase di messa a punto della saldatura.

4. PROVE

4.1 PROVE TECNOLOGICHE E METALLOGRAFICHE

Tutta una serie di prove convenzionali, quali le prove di strappo, gli esami metallografici ed i rilievi di durezza sono stati eseguiti.

Per quanto concerne le prove di strappo esse hanno sempre mostrato valori elevati (nell'ordine dei 3.000 kg) con rottura distribuita nella ZTA (3 prove), e a circa 100 mm dalla saldatura (2 prove).

Il carico di strappo è risultato uguale o superiore a quello del carico di rottura del tubo preso singolarmente senza mostrare apprezzabili contributi dovuti all'operazione di mandrinatura.

Per quanto concerne gli esami metallografici si può concludere che:

- Le saldature risultano ben eseguite e penetrate con sporadici casi di microporosità.
- Non è stato messo in luce nessun segno di cricche all'apice della saldatura.
- La penetrazione di saldatura è sempre nel range dello spessore del tubo mostrando, implicitamente, la correttezza dei parametri di saldatura adottati.

- La saldatura è in genere più ricca nel caso di sporgenza del tubo per effetto, verosimilmente, del maggior volume del bagno di fusione.

Per quanto concerne infine i valori di microdurezza essi hanno dato un "range" di 140-170 kg/mm² per il tubo di 176-182 kg/mm² per la piastra e valori più elevati per la zona fusa con massimi nell'ordine dei 210 kg/mm². Questi valori sono da considerare tutti accettabili e conformi alle informazioni riportate in letteratura.

4.2 PROVE DI VIBRAZIONE

4.2.1 Premessa

E' stato ritenuto utile svolgere alcune prove di vibrazione su simulacri di giunzione tubo-piastra allo scopo di verificare le reali condizioni di vincolo che introducono l'operazione di accostaggio saldatura e successiva mandrinatura completa dei tubi alla piastra tubiera.

4.2.2 Preparazione della prova

Per eseguire la prova in oggetto si è prescelto uno dei tubi più lunghi presenti.

Il vincolo di questo tubo alla piastra è stato realizzato per mandrinatura, saldando a TIG successivamente.

Sul tratto di tubo all'interno della piastra è stato incollato un estensimetro a superconduttore tipo KSPC-1-350-E4-11 avente "gage factor" pari a 152 e quindi molto sensibile.

L'estensimetro è stato fissato in prossimità della saldatura.

Il simulacro è stato successivamente ancorato rigidamente.

A circa 150 mm dalla saldatura del tubo è stata applicata una forza sinusoidale collegando lo stesso ad un vibratore elettrodinamico.

4.2.3 Risultati

Inizialmente è stato eccitato il tubo a 12 Hz con tre valori di forza diversi ottenendo i risultati di seguito elencati:

Kg	0.5	1	1.5
$\mu\epsilon$	10	20	30
Kg/mm ²	0.155	0.31	0.465

Si è potuto verificare che erano rispettate le condizioni lineari del sistema.

In una seconda fase si è voluto verificare se esistessero condizioni di "filtro" meccanico da parte del sistema al variare della frequenza. Come può essere rilevato dai dati di Tabella 4.2.1 si ha un comportamento normale sino a circa 170 Hz dopo di che nasce una campana di risonanza.

Infine sono stati misurati i valori di sollecitazione nel punto E1 (fig. 4.2.A) sotto sollecitazione sinusoidale a 12 Hz nel campo compreso tra 0,5 e 4 Kg picco analizzando tre condizioni:

- Tubo solo saldato alla piastra.
- Tubo mandrinato con 0,1 mm di espansione.
- Tubo mandrinato con 0,2 mm di espansione.

I dati ottenuti sono riportati in Tabella 4.2.II.

Tabella 4.2.1

FREQUENZA Hz	DEFORMAZIONE $\mu\epsilon$	SOLLECITAZIONE Kg/mm^2	FORZA kg (picco)
10	20	0.31	1
30	20	0.31	1
50	22	0.341	1
70	22	0.341	1
90	22	0.341	1
110	22	0.341	1
130	24	0.372	1
150	26	0.403	1
170	27	0.418	1
190	30	0.465	1
210	35	0.542	1
230	45	0.697	1
240	54	0.837	1
250	62	0.961	1

4.2.4 Discussione dei risultati

In base all'insieme delle prove eseguite si possono fare le seguenti osservazioni:

a) la mandrinatura del tubo sulla piastra tubiera prima dell'esecuzione della saldatura (accostamento) ha un effetto trascurabile probabilmente a causa del successivo rilascio del materiale.

L'esistenza di sollecitazione all'interno del tubo mandrinato porta a considerare la zona di saldatura come effettiva sezione di incastro del tubo.

b) con mandrinatura di 0,1 mm nel punto E1 si ha un valore (a parità di forza di eccitazione) che è metà di quello misurato sul tubo non mandrinato.

c) con mandrinatura di 0,2 mm nel punto E1 la sollecitazione diminuisce di oltre 10 volte rispetto alle condizioni di tubo mandrinato, mostrando con ciò la collaborazione della mandrinatura nello "scaricare" la saldatura e, in definitiva, nel dare alla saldatura il compito suo proprio di sigillo.

5. Conclusioni

L'attività descritta nel presente rapporto ha permesso ad ACO di acquisire tutte le conoscenze di base sulle problematiche della realizzazione di giunzioni tubo-piastra in Titanio per condensatori giungendo sino alla prequalifica del procedimento avendo preso, come riferimento, un condensatore reale.

Venendo ad un commento generale delle attività svolte si possono evidenziare le seguenti conclusioni:

a) La tecnica di accostamento del tubo, pre-saldatura, è essenziale per una buona riuscita della saldatura.

b) Il processo di saldatura vero e proprio è relativamente semplice e, una volta risolto il problema della protezione dall'ossidazione del bagno, e garantito un adeguato livello di pulizia, fonte di pochi problemi, anche in fase di riparazione.

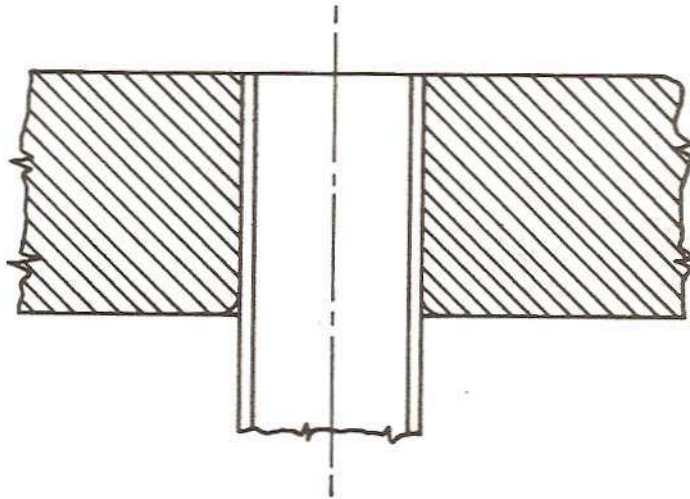
Le seguenti sono considerate principali peculiarità dell'operazione:

b.1) si ha buona stabilità del bagno anche con corrente continua e velocità di saldatura elevate.

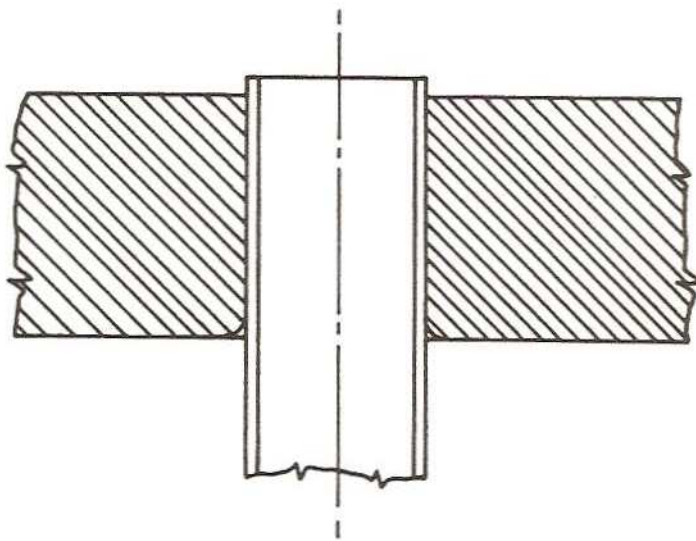
b.2) nel caso di tubo protruso il cordone risulta di regola più ricco.

b.3) il centratore della torcia può essere di tipo semplificato con gli ovvi riflessi sulla economia e semplicità di uso della macchina.

c) Il processo di mandrinatura di forza è delicato e deve essere condotto con molta cura onde non danneggiare la saldatura precedentemente effettuata.



Preparazione saldatura
"a raso"



Preparazione saldatura
a tubo protruso

FIG. 2.1, - PREPARAZIONE PREVISTA DI SALDATURA

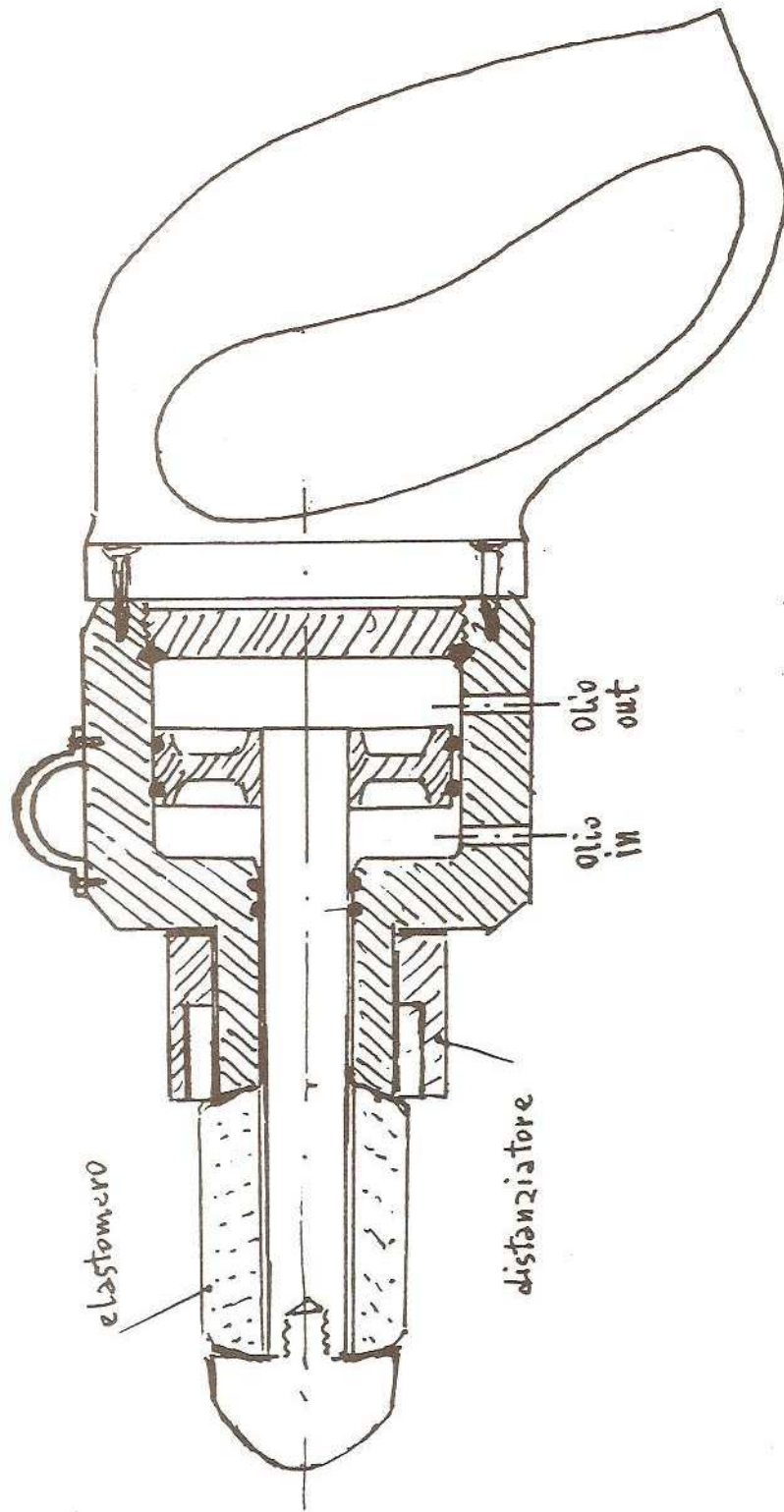


FIG. 3.1 - SCHEMA FUNZIONALE ACCOSTATRICE IDRAULICA

FIGURA 4.2.A

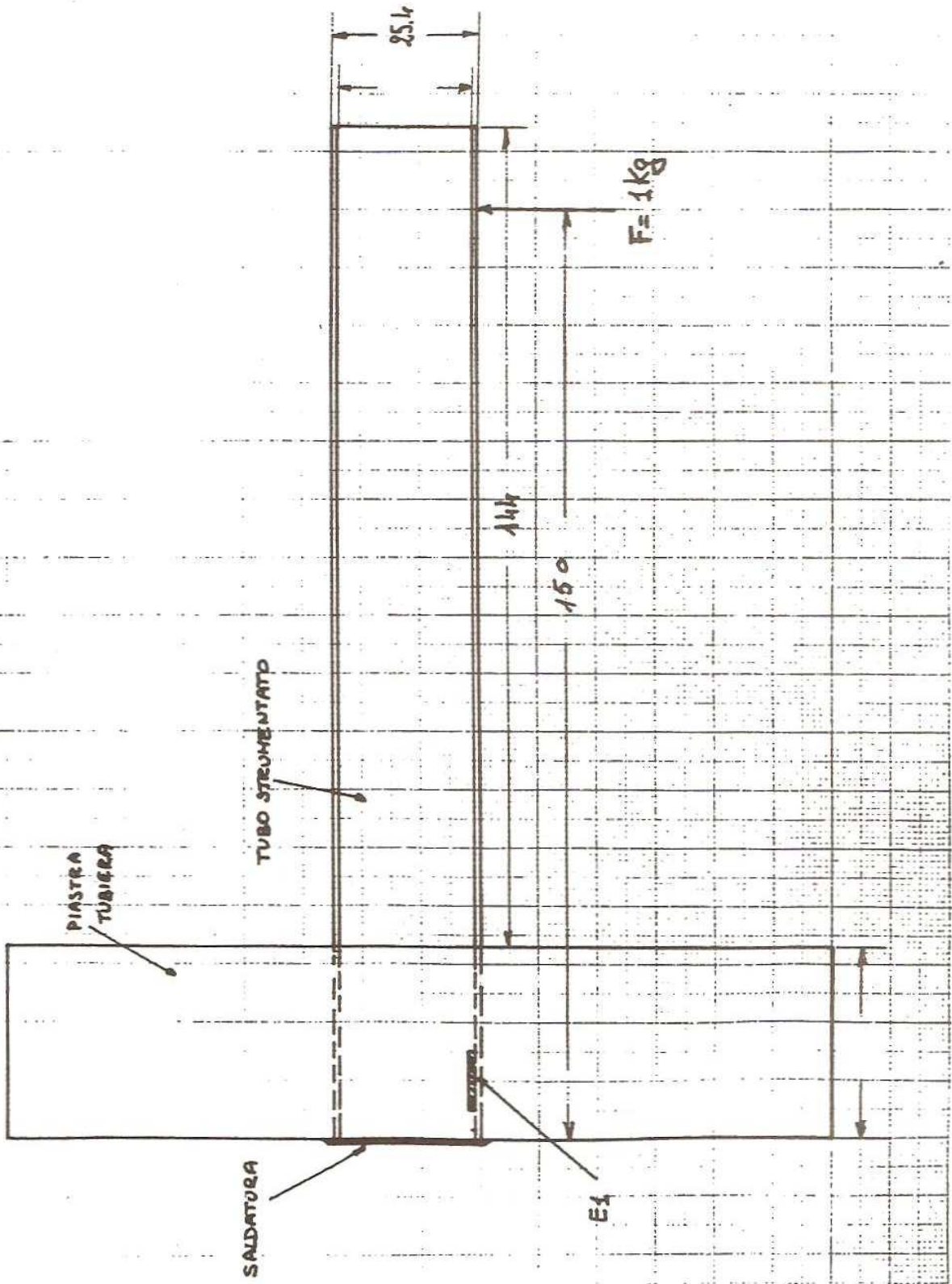


TABELLA 4.2.II

FREQUENZA DI ECITAZ. Hz	FORZA DI BELITAZ Kg P	TUBO NON MANDEINATO	TUBO MANDEINATO DI 0.1 mm	TUBO MANDEINATO DI 0.2 mm
		σ nel punto $E1 \text{ Kg/mm}^2$	σ nel punto $E1 \text{ Kg/mm}^2$	σ nel punto $E1 \text{ Kg/mm}^2$
12	0.5	0.10897	0.05557	0.01089
12	1	0.21794	0.11659	0.01852
12	1.5	0.32691	0.17653	0.02615
12	2		0.23973	0.03704
12	2.5			0.04031
12	3			0.04685
12	3.5			0.05557
12	4			0.06211

