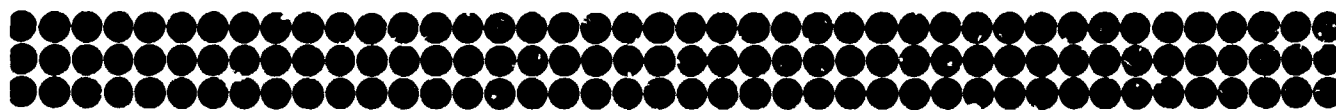


Comitato Nazionale Energia Nucleare

IT 760043

Griglia distanziatrice in zircaloy
per reattori ad acqua leggera bollente

F. BORGIANI, G.P. CALÌ, P. CERRETTI, P. PAZZI



RT/ING(75)18

Comitato Nazionale Energia Nucleare

**Griglia distanziatrice in zircaloy
per reattori ad acqua leggera bollente**

F. BORGIANI, G.P. CALÌ, P. CERRETTI, P. PAZZI

RT/ING(75)18

Testo pervenuto nel settembre 1975

Stampato in formato UNI presso il Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare,
Direzione Centrale Relazioni Esterne - Roma, Viale Regina Margherita 125 (tel. 8528)

I N D I C E

1. INTRODUZIONE
2. FILOSOFIA DI PROGETTO E CRITERI INFORMATIVI
3. SCHEMA REALIZZATIVO DI BASE
4. PROGETTAZIONE
5. CRITERI DI SCELTA DEI MATERIALI
6. SPECIFICHE DI APPROVVIGIONAMENTO E CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI
7. TECNOLOGIA COSTRUTTIVA, VALUTAZIONI E CONTROLLI
8. ASSEMBLAGGIO E OPERAZIONI DI FINITURA
9. COLLAUDO

1. INTRODUZIONE

L'oggetto di questo rapporto è un nuovo tipo di griglia distanziatrice per elementi di combustibile ad acqua leggera bollente (BWR) realizzata in lamiera di Zircaloy-4 e di lega di Nickel (Inconel 718 e/o X-750, Sanicro75-X).

Ciò si inquadra nel programma, sempre seguito dalla Divisione Reattori ad Acqua Leggera del Dipartimento Reattori Termici, di sviluppare e mettere a punto filosofie di progetto, tecniche di calcolo e di fabbricazione dei componenti degli elementi di combustibile per reattori ad acqua leggera bollente. Lo scopo è di produrre quelle conoscenze di base che mettano l'industria interessata nelle migliori condizioni per dare inizio alla politica dello svincolo graduale dalle licenze sui singoli componenti di un impianto nucleare.

Benchè il sistema delle licenze faciliti lo sfruttamento commerciale di una particolare tecnologia, da parte di un Paese che non ne disponga in proprio, è solo attraverso la gestione consapevole e qualificante del sistema delle licenze che si può arrivare all'assunzione graduale di responsabilità autonome di mercato nel campo dei singoli componenti di nocciolo e di impianto, nella realistica prospettiva ormai non più a lungo dilazionabile, dello svincolo del sistema generale di garanzia dell'impianto da quello dei suoi singoli componenti. Tale obiettivo potrebbe essere raggiunto mediante una "fase di inserimento" consistente nello sviluppo di soluzioni autonome relativamente alla progettazione ed alla fabbricazione di componenti di nocciolo e di impianto ad alto contenuto

tecnologico.

A tale scopo la Div. TERM-RAL, dopo analisi, valutazioni e sperimentazioni su griglie distanziatrici di tipo "standard" e dopo una serie di soluzioni realizzative intermedie, ha messo a punto un tipo di griglia di progettazione originale.

Tale griglia, oggetto di questo rapporto, rappresenta il contributo migliorativo alle soluzioni fino ad oggi adottate, per questo tipo di componenti. Il lavoro di progettazione si è svolto contemporaneamente allo studio e messa a punto di specifiche relative al tipo di materiale e di tecniche di fabbricazione da adottare per la soluzione realizzativa finale in rapporto alle particolari caratteristiche del materiale preventivamente scelto (Zircaloy-4).

Si è inoltre affrontato il problema dei criteri e delle tecniche di collaudo intermedio e finale del componente.

2. FILOSOFIA DI PROGETTO E CRITERI INFORMATORI

Lo schema realizzativo finale del progetto meccanico della griglia distanziatrice è scaturito da un continuo "feed back" con i criteri di base della progettazione.

Esso, infatti, tiene conto di risultati sperimentali ed analisi teoriche che assegnano ad ogni parametro il proprio grado di importanza e tendono a far scoprire l'eventuale esistenza di nuovi parametri precedenti non considerati. Un secondo "feed back" più approfondito avviene nella fase di vera e propria progettazione; infatti, una volta fissati i criteri fondamentali di progetto e considerato uno schema realizzativo, l'indagine quantitativa dei legami funzionali tra i diversi parametri, insieme ad un'analisi dei fattori economici e tecnici, permette di arrivare ad una soluzione ottimale del componente.

Lo schema logico di progettazione di una griglia è presentato in Fig. 1, mentre in Fig. 2 è mostrato un esempio della interazione tra i vari parametri tecnici.

Si è creduto opportuno mettere in risalto il processo che, in generale, porta al progetto di una griglia distanziatrice sia per sottolineare l'importanza del progetto in sé, sia perchè è un campo del tutto aperto a notevoli possibilità di sviluppo, per cui è necessario tenere sempre presenti nuove vie per una sempre più razionale progettazione.

I criteri informativi di base o funzione della griglia da cui discende la necessità della presenza nell'elemento di combustibile delle griglie distanziatrici sono:

- mantenere la distanza tra le barre entro le tolleranze ammesse;
- minimizzare le ampiezze di vibrazione delle barre di combustibile, causate dal flusso fluido refrigerante.

Conseguentemente la presenza della griglia nell'elemento di combustibile pone dei problemi di tipo meccanico, termoidraulico e neutronico, da cui scaturiscono ulteriori criteri informativi per i quali una griglia distanziatrice deve:

1. nel campo meccanico

- permettere l'espansione differenziale longitudinale delle barre del fascio, conseguente ai gradienti termici nell'elemento di combustibile, senza originare stati tensionali pericolosi per la stabilità meccanica delle barre stesse;
- contenere la corrosione da sfregamento o altro danneggiamento nelle parti in contatto tra barre e griglie;
- resistere alle forze in atto durante l'assemblaggio dei vari componenti dell'elemento di combustibile, il trasporto ed il caricamento nel nocciolo del reattore;

2. nel campo termoidraulico

- opporre la minima resistenza idraulica al passaggio del fluido refrigerante in modo da contenere al massimo le perdite di carico attraverso il nocciolo del reattore;
- minimizzare la formazione di punti di ristagno della corrente

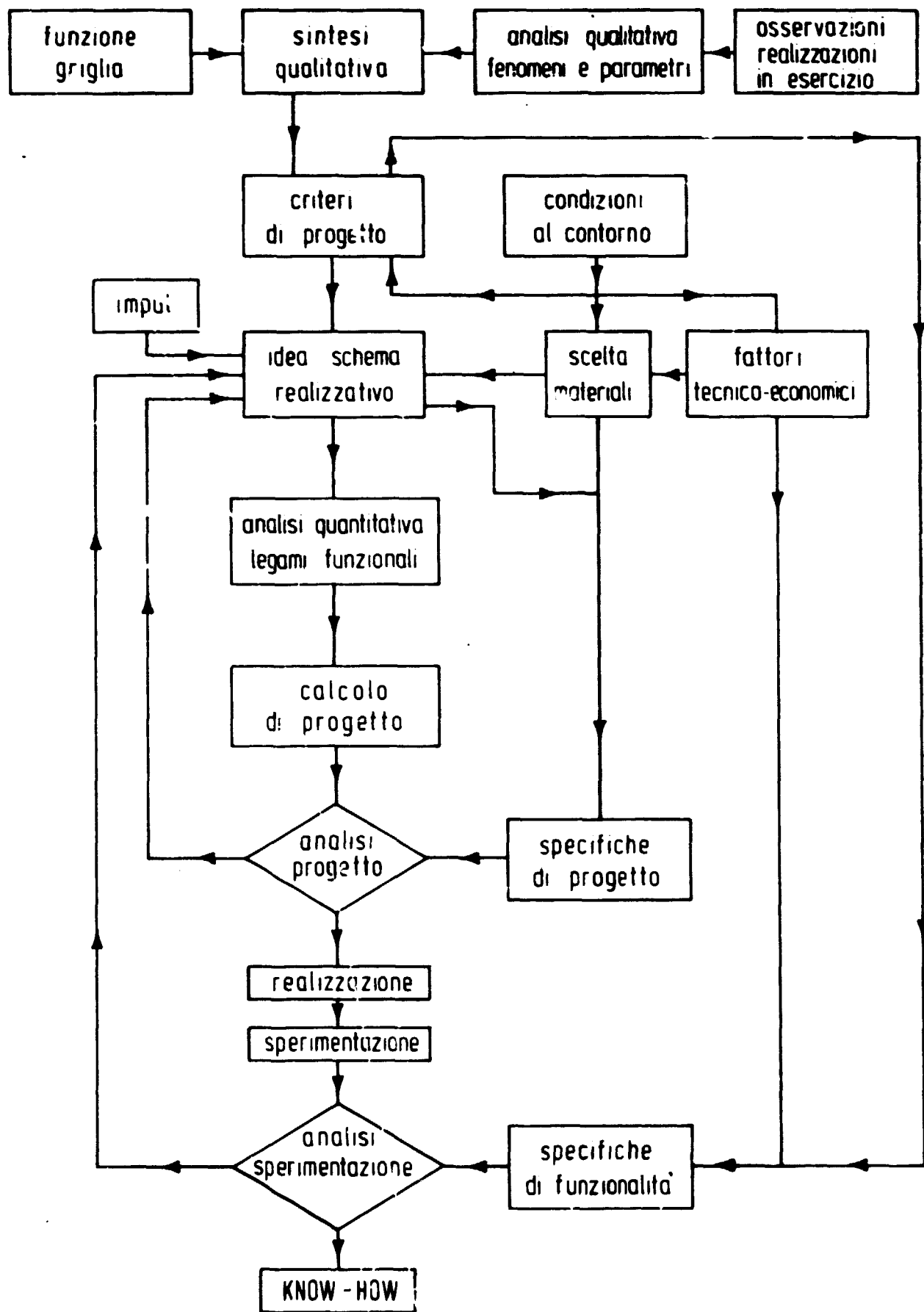


Fig 1 - Schema di progettazione di una griglia

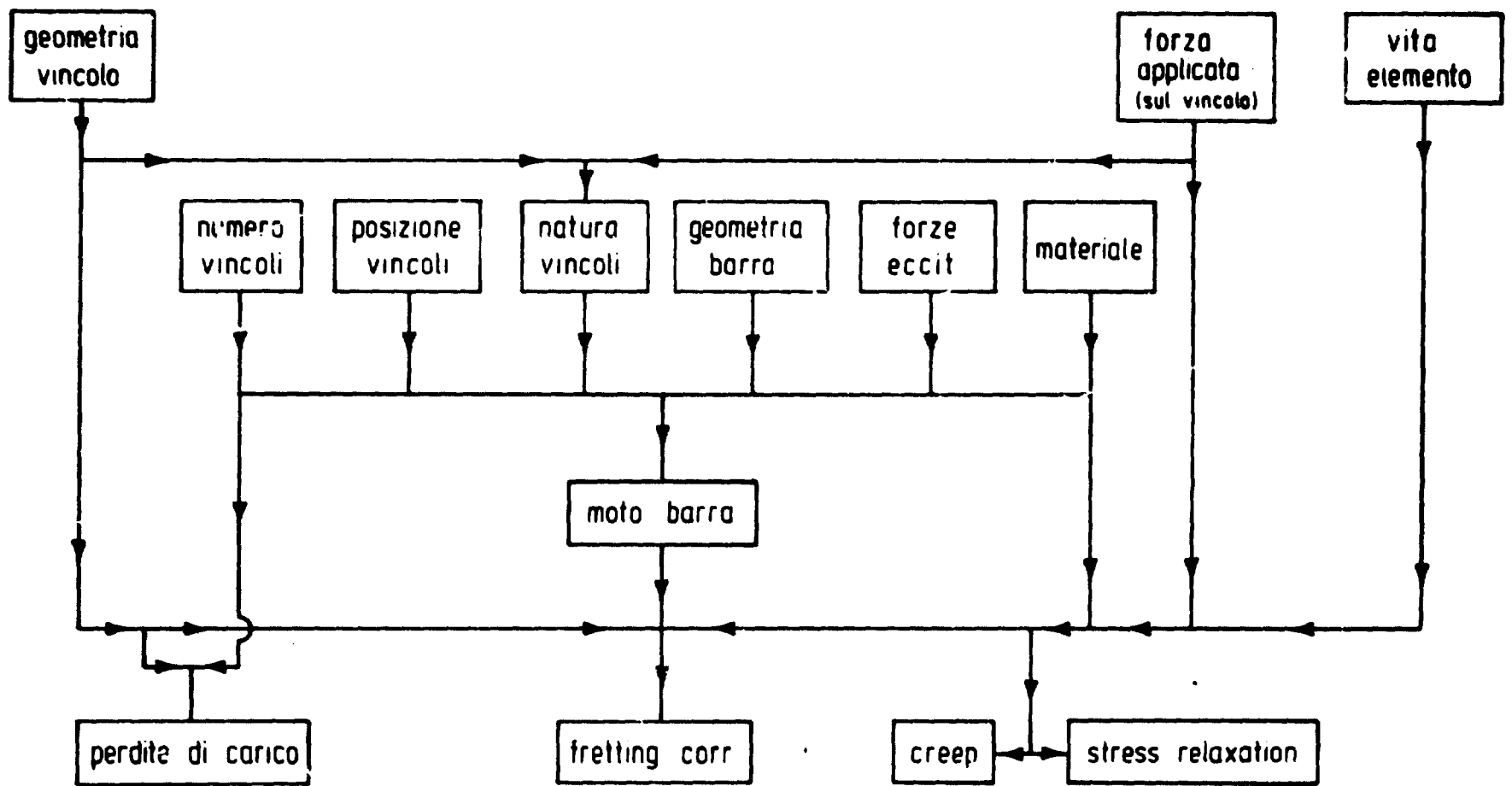


Fig 2 - Esempio interazione parametri

di fluido refrigerante;

- promuovere, se richiesto, il miscelamento del refrigerante fra i diversi sottocanali dell'elemento di combustibile.

3. in campo neutronico

- avere un basso assorbimento neutronico.

Nel campo economico il discorso è più complesso e necessita di essere fatto a parte: è evidente, infatti, che qualsiasi miglioramento non ha alcun senso se visto solo da un punto di vista tecnico. Di conseguenza se il miglioramento tecnico di una o più funzioni delle griglie ne fa aumentare il costo finale è necessario controllare se vi è un superiore guadagno economico in termini o di semplicità costruttiva o di minori perdite di carico attraverso il nocciolo o di minore probabilità di rottura (sia della griglia stessa che della barra) o di economia neutronica.

A titolo di esempio si prende in esame il criterio informatore relativo al minimo assorbimento neutronico. Qui di seguito (1) viene sviluppata la corretta interpretazione progettistica di tale criterio portando a confronto una griglia di tipo "standard", costruita in AISI ed in Inconel con la griglia avanzata, trattata nel presente rapporto, costruita in Zircaloy-4 ed Inconel: la variazione di reattività, nel passaggio dal tipo "standard" a quello "avanzato" è pari a 0.402%.

Per valutare la rilevanza di tale variazione si consideri il caso (per i tipi di reattore ai quali le due griglie sono destinate) in cui il combustibile inizi la vita in reattore con un eccesso di reattività del 23% e termini con un residuo del 3%. Poiché si è ammesso che la vita del combustibile corrisponde ad una perdita di reat

tività del 20%, il guadagno (0.402%) che qui interessa porta un allungamento percentuale della vita del combustibile in reattore, valutabile dell'ordine del 2%. Se ne deduce che l'innovazione, per essere economicamente vantaggiosa a parità di prestazioni, non deve comportare un aumento del 2% sul costo del ciclo del combustibile. Se si considera che il costo di fabbricazione (2) incide per circa il 30% sul costo del ciclo e che il costo complessivo delle parti meccaniche è valutabile attorno al 40% del costo globale dell'elemento di combustibile, se ne deduce che l'introduzione delle griglie "avanzate" non deve comportare un aumento percentuale del costo complessivo delle parti meccaniche superiore al 20%, se si vuole un vantaggio economico da tale innovazione. Tenendo conto che il costo delle griglie distanziatrici rappresenta il 25% del costo complessivo delle parti meccaniche, ne deriva che l'impiego della griglia "avanzata", ha un senso da un punto di vista strettamente economico solo se il suo costo non risulta superiore del 65% del costo di quella di tipo standard.

3. SCHEMA REALIZZATIVO DI BASE

Tenendo, dunque, presenti i criteri informativi descritti nel paragrafo 2 e la necessità di adoperare, quale materiale da costruzione, lamiera di Zircaloy, si è arrivati a proporre un tipo di griglia che:

- 1- sia costruibile con materiali fortemente anisotropi ed a bassa caratteristica di allungamento uniforme;
- 2- sia compatta e rigida in tutte le direzioni;
- 3- ogni barra sia vincolata tramite una serie di appoggi rigidi ed elastici. Gli appoggi elastici permettono il recupero, in fase di assemblaggio griglia-barre, delle tolleranze di lavorazione e l'ottenimento di una forza di contatto tra appoggi e barre necessaria per impedire a queste ultime di avere moti trasversali a livello di griglia e nel contempo, limitando al massimo quelli ad altri livelli. Gli appoggi rigidi impongono alla barra una ben definita posizione all'interno di ogni singola "maglia" (si intende per "maglia" della griglia un quadrato per il cui centro passa l'asse di una barra e la cui lunghezza è pari alla distanza fra gli assi di due barre contigue della stessa fila);
- 4- gli appoggi elastici siano indipendenti dalla struttura della griglia stessa. Ciò semplifica e rende pressochè indipendente la progettazione dell'appoggio elastico da quella della struttura, rendendo possibile la scelta di materiali diversi e più adatti alle due differenti esigenze funzionali;
- 5- gli appoggi elastici siano tali da garantire uno sforzo ben definito ed uguale sulle barre con cui vengono a contatto;

6- gli appoggi rigidi siano localizzati in modo tale da rendere minimo lo stato di sollecitazione sulla struttura della griglia stessa, causato dalla forza di reazione al contatto con le barre, presentino una sezione minima di ostacolo al passaggio del fluido refrigerante e consentano al fluido di lambire con la maggiore uniformità possibile la superficie della barra.

La fig.3 mostra una vista assonometrica della griglia così come realizzata per il caso particolare di un elemento di combustibile con 36 barre poste a reticolo quadrato. In ogni caso questo tipo di griglia può essere realizzato per elementi di combustibile con un numero di barre variabile col quadrato di un numero intero pari. La griglia è costruita da due serie di paratie differenti h ed i (fig.3), succedentisi alternativamente e disposte a 90° così da formare il reticolo quadrato delle "maglie" della griglia. Esistono, inoltre, quattro "paratie esterne" l che definiscono i contorni della griglia stessa. Sulle paratie h sono ricavati per piegatura gli "appoggi rigidi" c . Tale piegatura è stata realizzata in un piano trasversale, cioè in un piano perpendicolare alla direzione dell'asse delle barre. Questi appoggi c , a quattro a quattro, giacciono sui piani contenenti gli assi delle barre di una stessa fila. I quattro appoggi, come mostrato con più dettaglio nella fig.4, si presentano alternativamente a sinistra ed a destra rispetto al piano di giacitura della paratia h . Ciò per realizzare l'appoggio di barre adiacenti e simmetriche rispetto alla paratia h . Invece le paratie i , che non presentano alcuna piegatura, servono di supporto agli "appoggi elastici" a , che sono infatti ricavati da una lamiera differente da quella con cui sono realizzate le paratie i . Sulle "paratie esterne" l sono stati

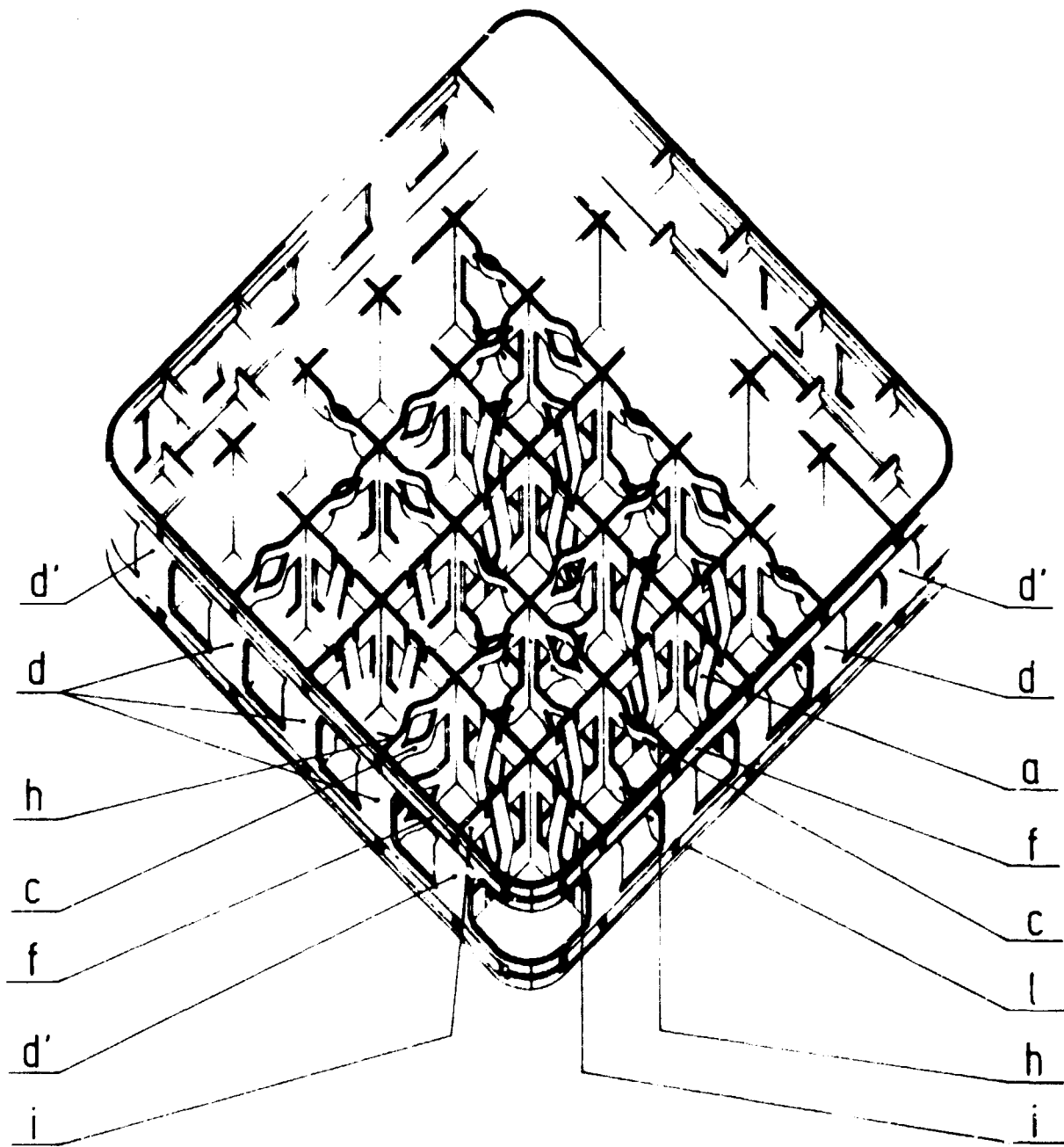


Fig. 3 - Griglia distanziatrice per BWR

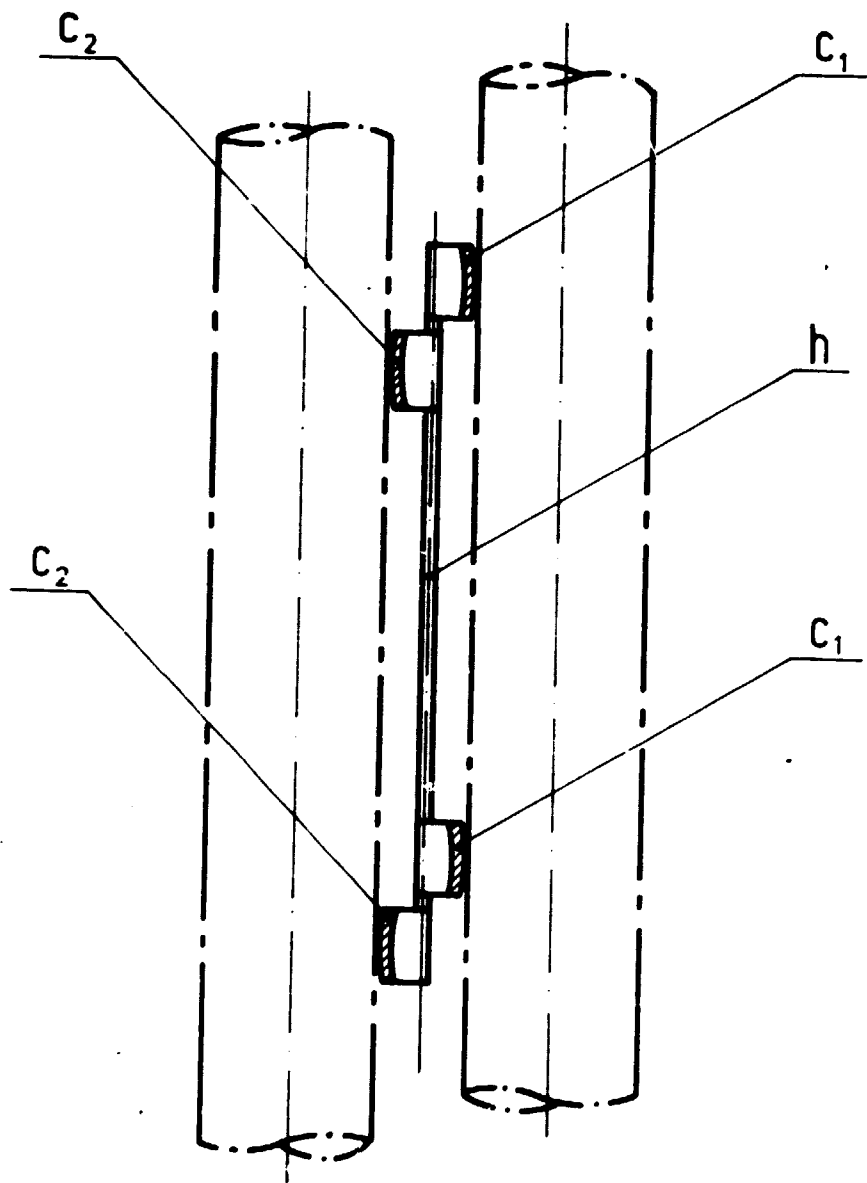


Fig. 4

ricavati, sempre per piegatura, sia gli appoggi rigidi f sia i risalti d e d' .

L'operazione di piegatura è stata, sia per gli appoggi rigidi f che per i risalti d e d' , realizzata in un piano perpendicolare a quello in cui giace la paratia l e parallelo all'asse delle barre. In particolare, onde permettere un migliore centraggio della griglia nel fodero ed avere una limitata superficie di riferimento griglia-fodero, grossi agli spigoli della griglia, sono di altezza superiore a quella dei risalti d' . La presenza dei risalti d è necessaria allo scopo di poter lavorare la lamiera, che realizza le paratie l , di sola piegatura. Infatti, come si vede nella fig. 5, i risalti d sono più lunghi di quelli d' in modo tale da compensare la maggiore profondità di piegatura, Δ , di questi ultimi.

Da quanto fin qui detto scaturisce evidente che la prerogativa saliente di questo progetto consiste nella realizzazione di una griglia interamente con operazioni di piegatura. Questo perchè, volendo adoperare leghe di Zirconio, ragioni meccaniche e tecnologiche consigliano di ridurre al minimo le deformazioni plastiche del materiale come verrà meglio chiarito nel seguito. Tuttavia ciò ha dei notevoli svantaggi dal punto di vista della rigidità delle paratie nello stesso piano di piegatura. Conseguentemente la soluzione del problema è quella di realizzare una combinazione delle "direzioni di piegatura" delle paratie interne h ed i ed esterne l che porti ad un assemblato con caratteristiche di rigidità ottimali nelle varie direzioni. Infatti la maggiore disposizione alla deformazione trasversale delle paratie interne h viene compensata dalla maggiore rigidità, nella stessa direzione trasversale, sia dalle paratie interne i che di quelle esterne

l; mentre la maggiore disposizione alla deformazione longitudinale delle paratie esterne l viene compensata dalla maggiore rigidità, nella stessa direzione, delle paratie interne h.

Al fine di completare la descrizione, in fig. 6a, b è rappresentata schematicamente la posizione longitudinale (fig. 6a) e trasversale (fig. 6b) degli appoggi rigidi c ed elastici a relativi ad una singola "maglia". Si può osservare che il piano di azione α , perpendicolare all'asse della barra e comune ai due appoggi elastici a, è longitudinalmente interno rispetto alla posizione degli appoggi rigidi c. Inoltre, i due punti di contatto barra-appoggio elastico giacciono su due generatrici della barra a 90° tra loro ed a quelle su cui agiscono a due a due gli appoggi rigidi.

La disposizione complessiva degli appoggi è risultata dal compromesso tra l'esigenza di minimizzare i moti vibratori trasversali delle barre, di realizzare un posizionamento preciso delle barre stesse e di ottenere nello stesso tempo una semplicità costruttiva della griglia. Infine, in fig. 7 si può vedere la rappresentazione assonometrica dell'elemento elastico o "appoggio elastico" adottato.

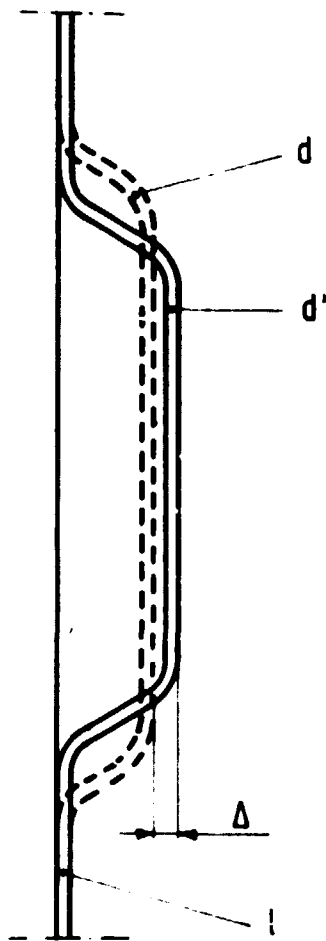


Fig. 5

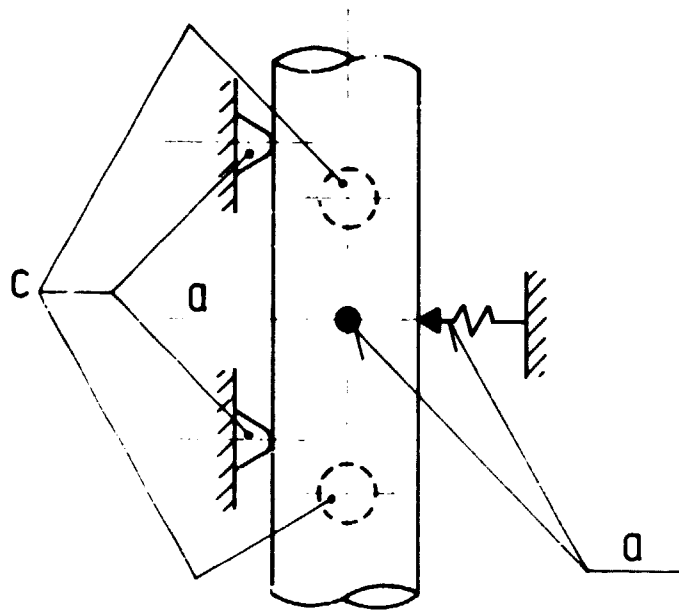


Fig. 6 a

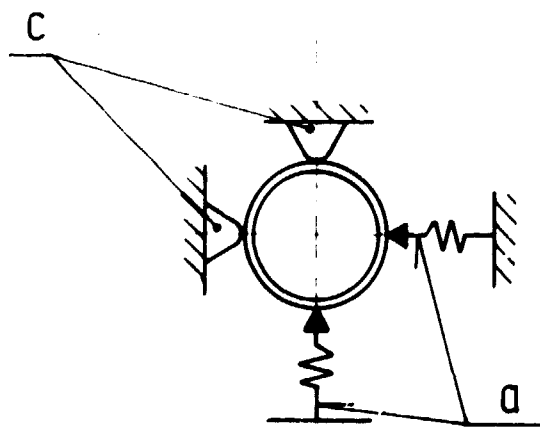


Fig. 6 b

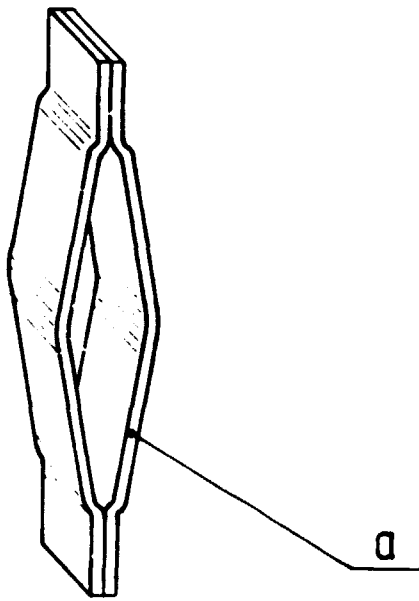


Fig. 7

4. PROGETTAZIONE

Definito nel capitolo precedente lo schema realizzativo della griglia, si può passare al dimensionamento della stessa. In questo capitolo, quindi, verrà fatta innanzitutto un'analisi qualitativa delle forze che si originano ai contatti tra barra e griglia per passare, poi, allo schema di gestione dei parametri, tenendo conto di considerazioni limitanti il loro valore, per arrivare, infine, al progetto della griglia stessa.

4.1 Forze che si originano ai contatti barra-griglia.

Lo schema realizzativo della griglia porta, per ragioni costruttive, ad una asimmetria geometrica e, quindi, di forze al contatto tra barra e griglia per tutte le barre escluse quelle d'angolo. In particolare questa asimmetria, mentre è limitata ad una sola direzione per le barre di lato, come mostrato in fig. 8, riguarda entrambe le direzioni a 90° delle barre interne, come indicato in fig. 9. Occorre notare che l'alternanza del verso di piegatura effettuato sugli appoggi rigidi lungo ogni paratia fa sì che tutte le barre interne si trovino nella stessa condizione di vincolo e che le forze complessive esercitate da ciascuna di queste nella parte superiore della griglia siano uguali a quelle esercitate nella sua parte inferiore. In questo modo la griglia risulta nel complesso uniformemente caricata. Ciò è mostrato schematicamente nella fig. 10.

Fra le grandezze geometriche e le forze in gioco valgono le relazioni:

$$(1) \quad \frac{P_1}{P_2} = \frac{L+C}{L-C}$$

$$(2) \quad P = P_1 + P_2$$

dove:

P è la forza esercitata dall'appoggio elastico sulla barra;

P_1 e P_2 sono le reazioni che gli appoggi rigidi esercitano sulla barra;

L è la distanza tra l'appoggio rigido inferiore e quello superiore;

C è la distanza tra due appoggi omologhi superiori o inferiori.

La relazione (1) è stata graficata nella fig. 11. Il progetto della griglia dovrà prendere come riferimento la distribuzione di forze relativa ad una barra interna in quanto per questa si hanno i valori massimi e minimi delle forze.

4.2 Elemento elastico.

Il calcolo dell'elemento elastico, rappresentato in fig. 12, si basa sullo schema della fig. 13; si suppongono, cioè, i due bracci incastrati alle due estremità sebbene liberi di spostarsi assialmente. Si tiene conto, inoltre, delle piegature effettuate presso le due estremità.

Con queste ipotesi si ottiene il sistema di equazioni:

$$(1) \left\{ \begin{array}{l} b = \frac{P}{\Delta} \left\{ \left(\frac{l}{h} \right)^3 \frac{1}{16 E_c \cos \theta} + \frac{x l \cos \theta}{4 h G_c} \right\} \\ \theta = \arctg \frac{2f}{l} \\ f = \frac{D}{2} - h - \frac{c}{2} - t + \Delta \\ G_c = \frac{3}{4} \frac{P l}{b h^3} \end{array} \right.$$

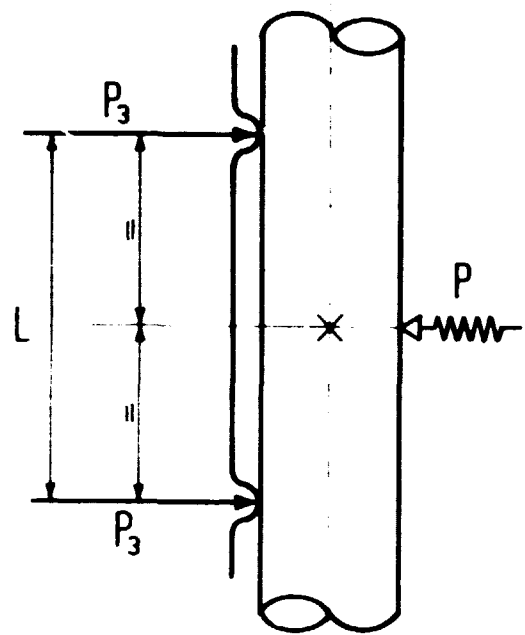
che lega tra di loro le diverse grandezze.

Per mezzo di queste equazioni, come specificato nel paragrafo seguente, si giunge al dimensionamento dell'elemento elastico.

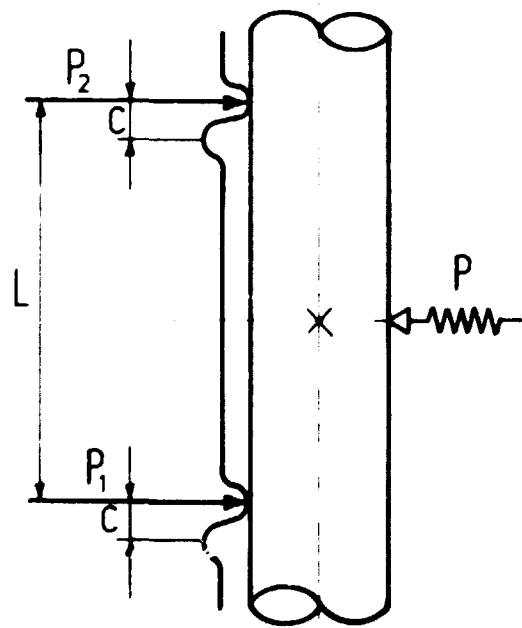
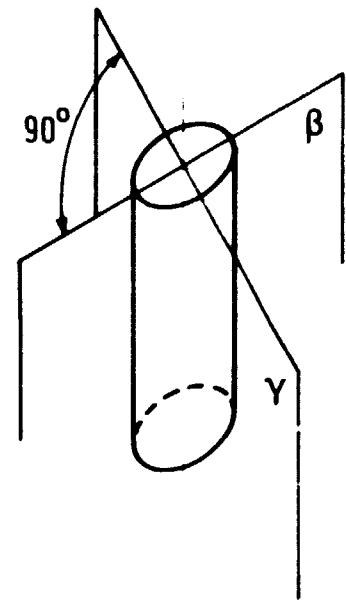
4.3 Schema di progettazione.

Come detto precedentemente la griglia va progettata tenendo conto della distribuzione di forze relativa ad una barra interna.

I parametri e le principali considerazioni che vincolano il dimensionamento della griglia sono:



piano β



piano γ

Fig. 8

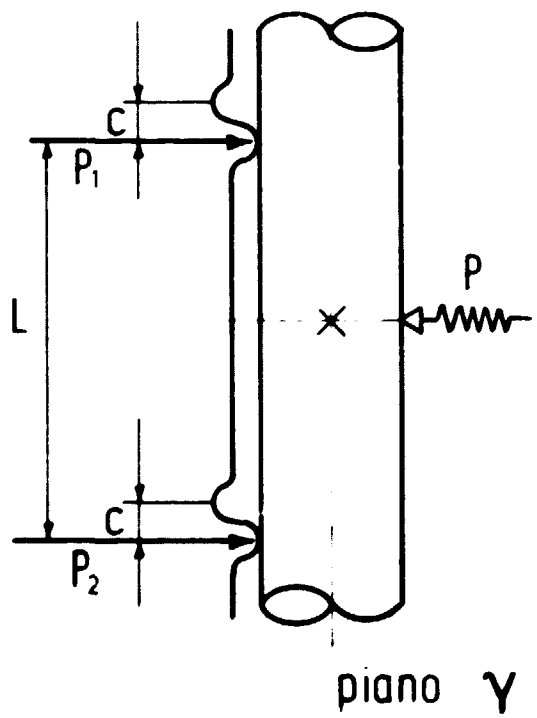
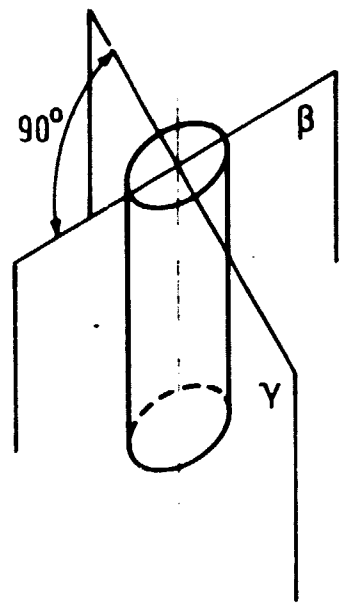
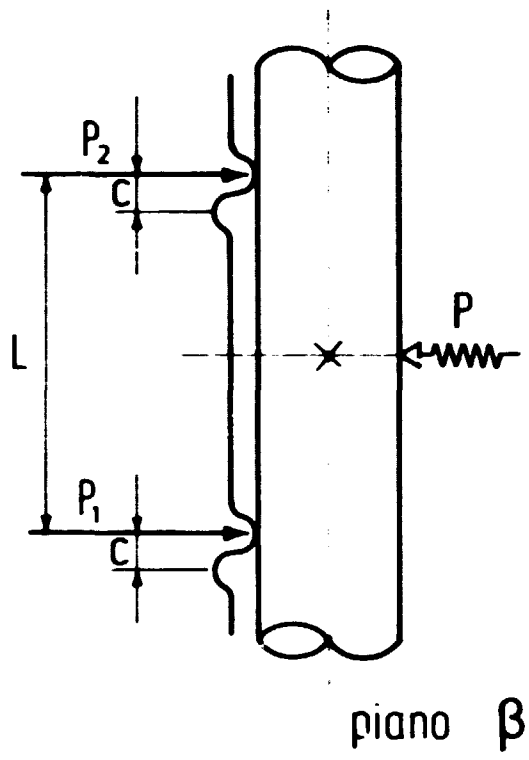


Fig. 9

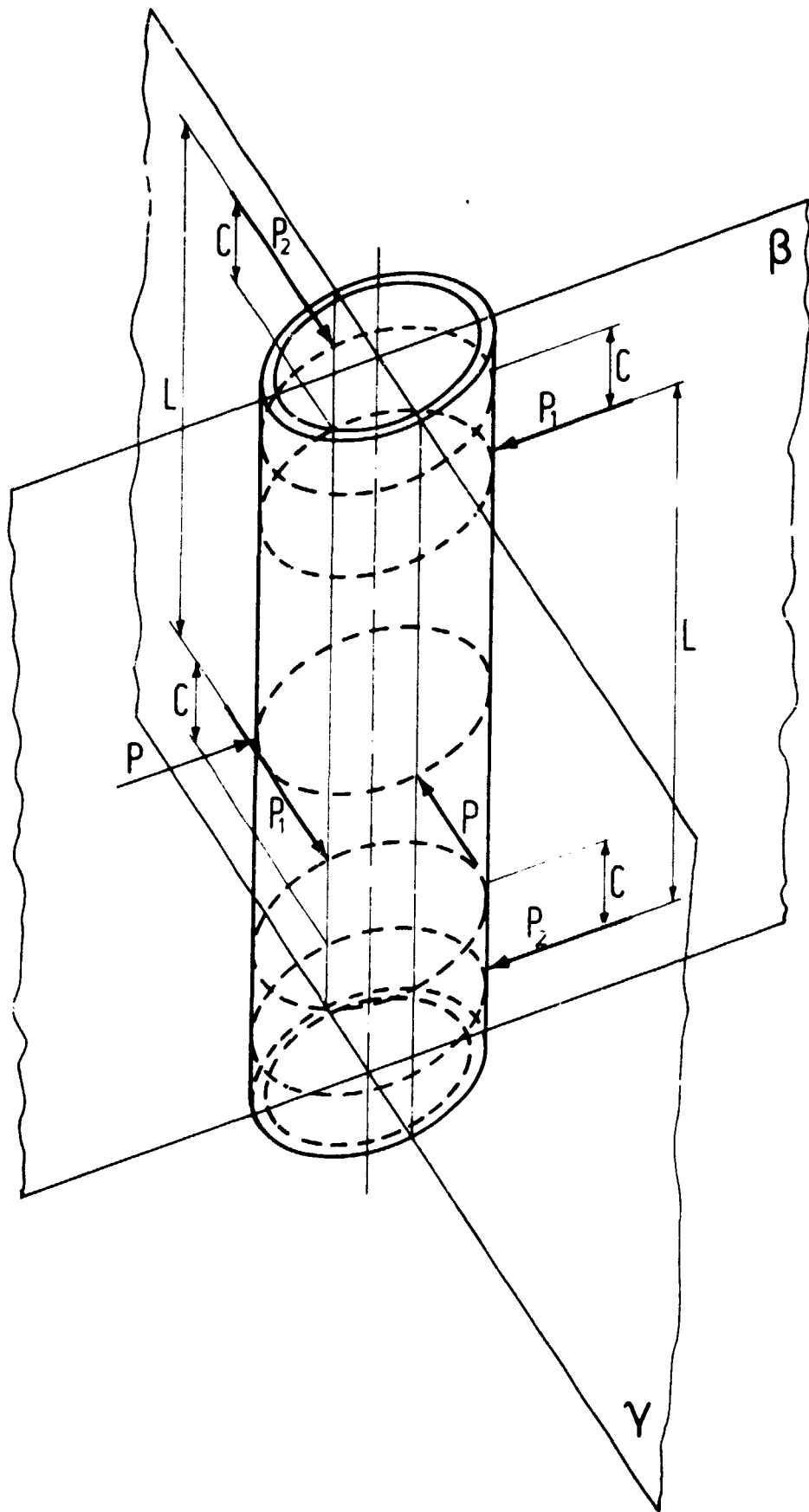


Fig. 10

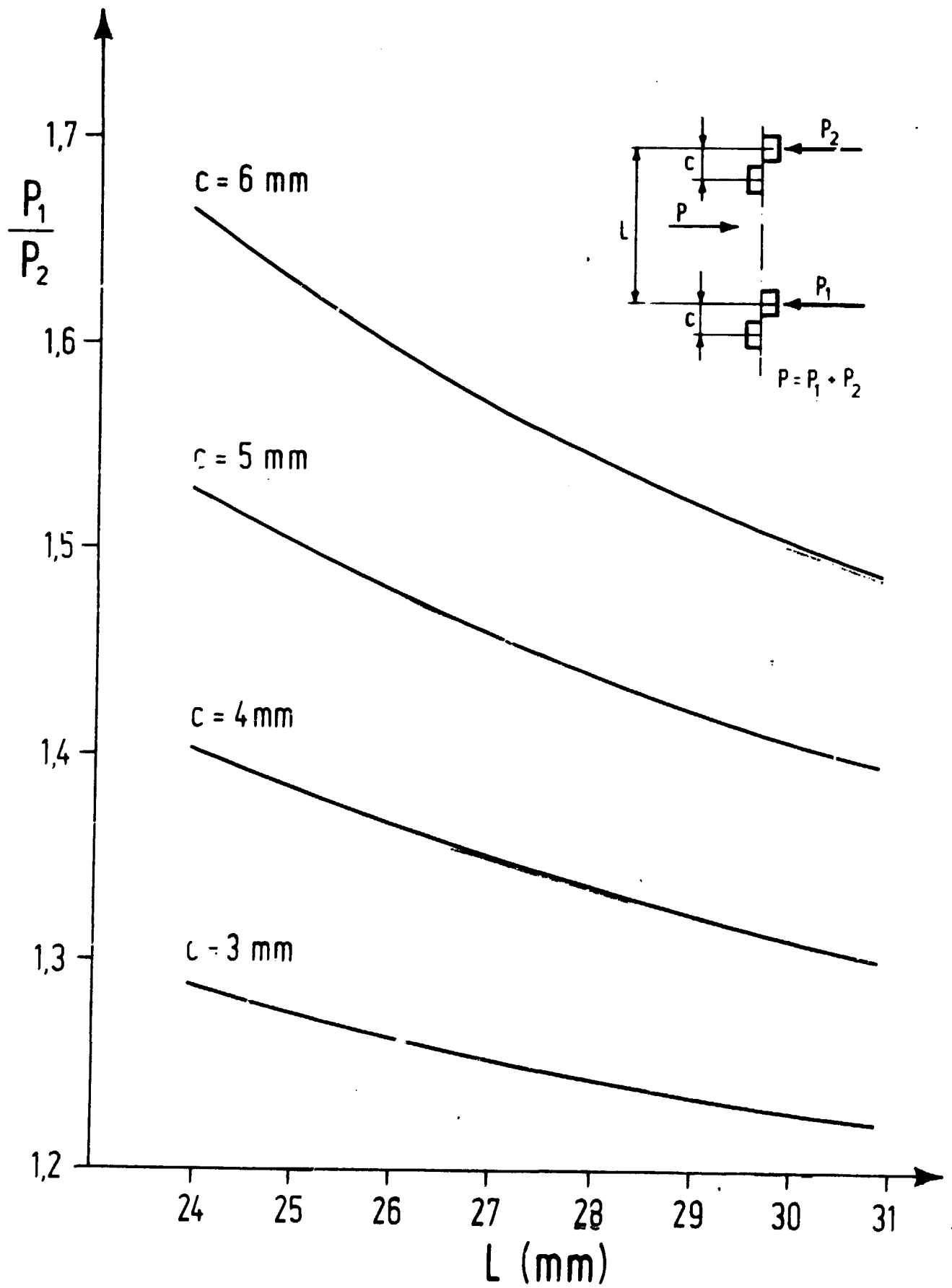


Fig. 11

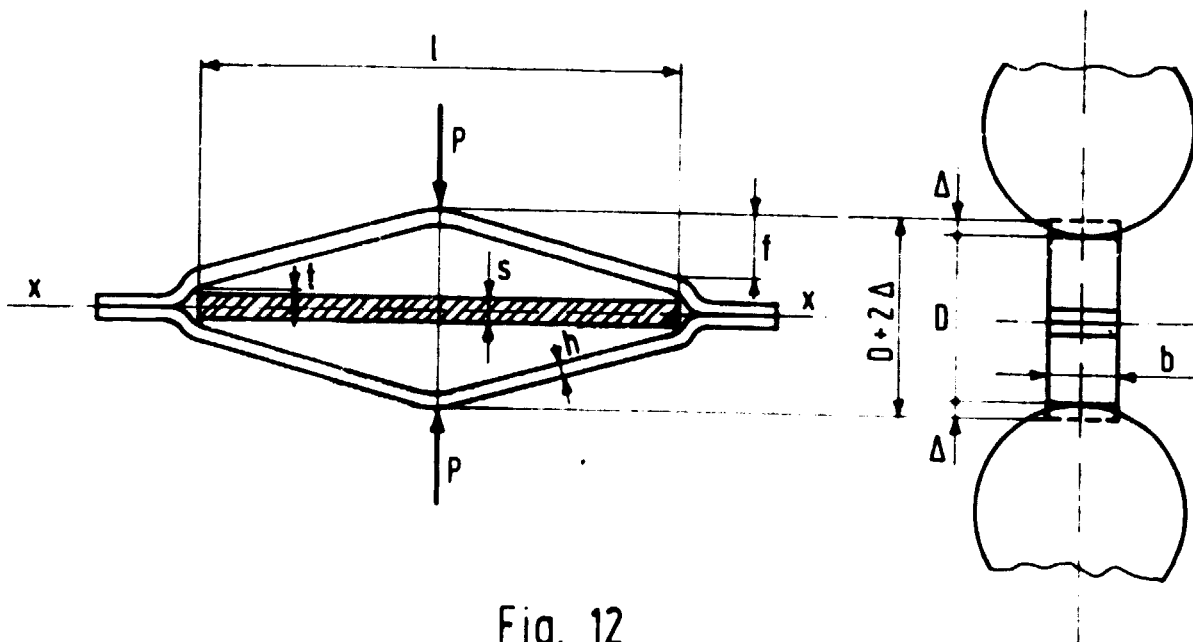


Fig. 12

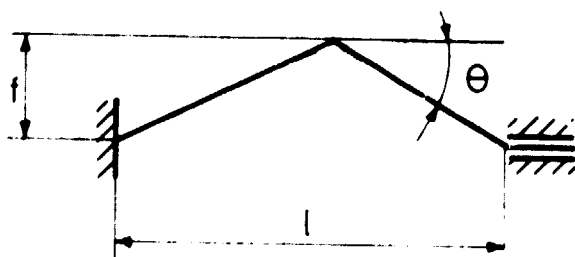


Fig. 13

- passo tra le barre p ;
- diametro delle barre \emptyset ;
- pressione specifica al contatto barra-elemento elastico e barra-griglia;
- fenomeno di fretting ai contatti barra-elemento elastico e barra-griglia;
- stress relaxation del materiale dell'elemento elastico;
- creep del materiale della struttura della griglia;
- tolleranze geometriche delle celle della griglia;
- opportunità di avere una griglia più bassa possibile (nella direzione longitudinale) per contenere la quantità di materiale;
- opportunità di tenere il più basso possibile il rapporto $P1/P2$ per contenere la disuniformità di carico sulla griglia;
- il passo tra le barre p e il diametro di queste \emptyset determinano la distanza nominale D tra due barre contigue;
- il fenomeno della fretting corrosion ed il valore limite di pressione specifica al contatto barra-elemento elastico determinano un valore massimo P_x per la forza esercitata dalla molla sulla barra; d'altra parte considerazioni legate alla necessità di vincolo della barra ne determinano un valore minimo P_m ;
- considerazioni legate al costo della griglia impongono di non scendere, per la tolleranza geometrica della "maglia" della griglia, al di sotto di un valore limite $\pm \delta_0$. Tale tolleranza include tutte le tolleranze geometriche della "maglia" e della barra che portano ad una variazione del carico P della molla;
- dai valori limiti P_m e P_x del carico e dal valore di δ_0 si trova il valore limite di interferenza Δ_0 tra un braccio della molla e la rispettiva barra in condizioni nominali. Si ha:

$$(1) \quad \Delta_0 = \delta_0 \frac{P_x + P_m}{P_x - P_m}$$

il carico nominale è ovviamente:

$$(2) \quad P = \frac{F_k + P_m}{2}$$

- le condizioni di funzionamento dell'elemento elastico individuano, nei confronti della stress relaxation, un valore massimo ammissibile σ_{el} per la sollecitazione nell'elemento elastico.

Il valore massimo della sollecitazione in condizioni nominali $\bar{\sigma}_e$ sarà dato da:

$$(3) \quad \bar{\sigma}_e = \sigma_{el} \frac{P}{R}$$

- le condizioni di funzionamento della griglia individuano, inoltre, nei confronti del creep, un valore massimo ammissibile σ_{s1} per la sollecitazione nella struttura della griglia.

Analogamente a prima il valore massimo della sollecitazione in condizioni nominali $\bar{\sigma}_s$ sarà dato da:

$$(4) \quad \bar{\sigma}_s = \sigma_{s1} \frac{P}{R}$$

A tutti questi parametri, che costituiscono dei dati fissi del problema, si aggiungono dei campi di esistenza per altri parametri legati a considerazioni geometriche, di ingombro, ecc.

Così la lunghezza l dell'elemento elastico, la sua larghezza b ed il suo spessore h possono essere limitati rispettivamente entro i limiti:

$$(5) \quad \begin{aligned} l_1 &\leq l \leq l_2 \\ b_1 &\leq b \leq b_2 \\ h_1 &\leq h \leq h_2 \end{aligned}$$

Ciò è mostrato nello schema di progettazione della fig. 14.

Questo schema mostra come sia necessario, prima di iniziare i calcoli, una verifica di compatibilità degli "inputs" assegnati che determinano il dimensionamento dell'elemento elastico. Tale compatibilità esiste, se esiste, nelle condizioni di "input" assegnate, l'area rappresentata nella fig. 15. Qualora questa compatibilità non esista occorre cambiare qualcuno degli

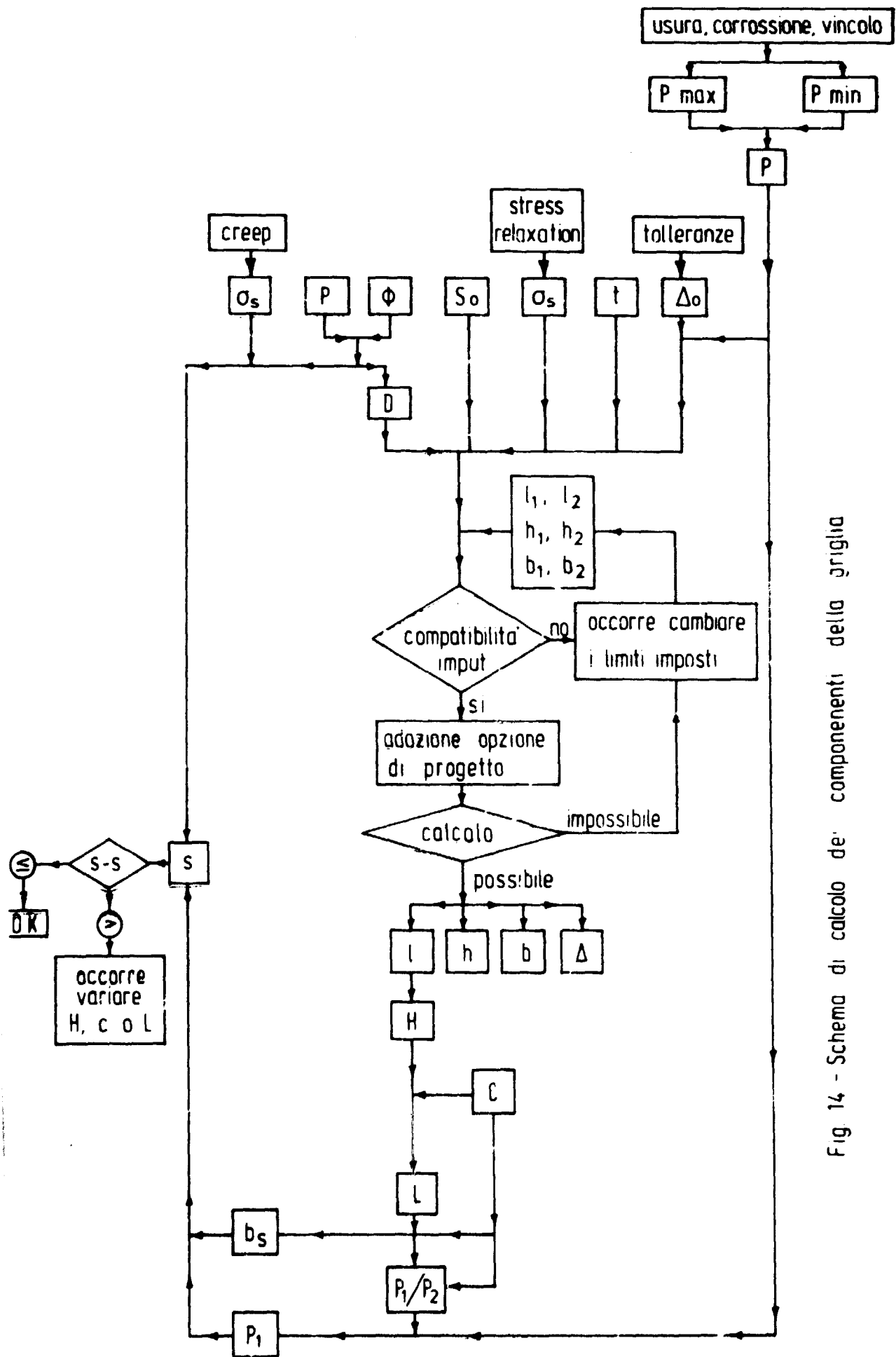


Fig. 14 - Schema di calcolo de' componenti della griglia

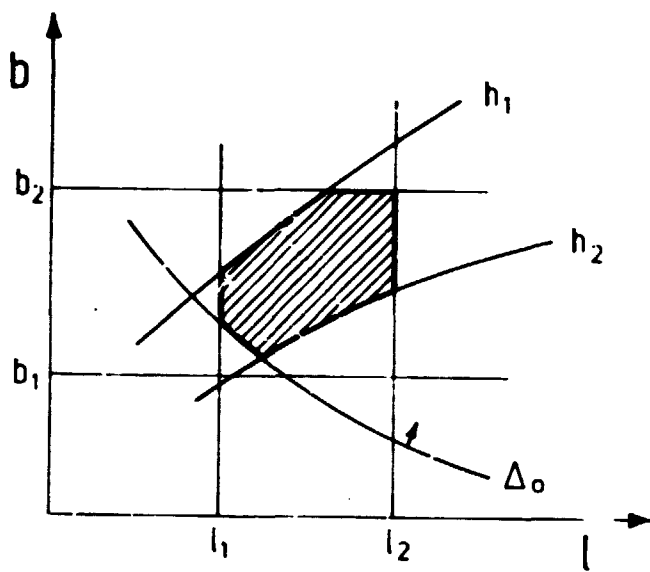


Fig. 15

"inputs" assegnati rinunciando, per esempio, a limiti stretti per qualcuna delle condizioni imposte. Qualora la compatibilità esista, esistono infinite soluzioni al problema ciascuna rappresentata da un punto interno all'area della fig. 15. Per scegliere una delle infinite soluzioni si deve ricorrere ad opzioni di progetto particolari come:

- lunghezza minima dell'elemento elastico (per ottenere una griglia più bassa possibile);
- volume minimo dell'elemento elastico (per introdurre le minor quantità possibile di materiale per ragioni di assorbimento neutronico);
- spessore dell'elemento elastico compreso nella serie discreta di valori standard posti dal mercato.

L'adozione di queste particolari opzioni permette di giungere al dimensionamento dell'elemento elastico la cui lunghezza l vincola l'altezza totale H della griglia. Come schematizzato nella fig. 16, la scelta di un valore di c porta a definire il valore di L , distanza assiale tra due appoggi rigidi, e quindi il rapporto $P1/P2$ e poiché è noto il valore di P , il valore del carico massimo $P2$ sugli appoggi rigidi.

La scelta del valore di c , inoltre, aiuta a definire un valore possibile di b_s , larghezza della sezione del profilo dell'appoggio rigido e quindi in base al valore di σ_s , definito nella (4), si può dimensionare l'appoggio rigido.

Qualora sia necessario impiegare, per lo spessore dell'appoggio rigido e quindi della struttura un valore diverso da quello Δ_0 del quale si è tenuto conto nel dimensionamento dell'elemento elastico, occorre rifare in parte i calcoli, variando, ad esempio, il valore di c o quello di b_s o, al limite, allargando qualcuno dei limiti (5).

Con successive iterazioni è comunque possibile arrivare al dimensionamento sia degli appoggi elastici sia degli appoggi rigidi della griglia.

Questi elementi costituiscono le parti principali nel progetto della griglia distanziatrice.

4.4. Tolleranze di lavorazione

Dall'analisi di criteri informativi e di considerazioni pratiche legate alla realizzazione, risulta che la tolleranza sulla chiave esterna della griglia, più o meno 0,2 mm. può essere anche dello stesso ordine di grandezza di quella dell'interasse delle barre. Occorre però osservare che la probabilità che dei pezzi meccanici assemblati, realizzati con tolleranze parziali eguali o di poco inferiori a quelle totali, rientrino nei limiti delle tolleranze totali è molto piccola, con una conseguente alta percentuale di scarti di lavorazione. Daltronde il restringere eccessivamente le tolleranze parziali, in quanto quelle totali sulla chiave della griglia sono imposte a priori dall'accoppiamento col foderec, si paga con un più elevato costo di costruzione. Si è cercato, quindi, di assegnare alle varie quote parziali una tolleranza tale da ammettere che una griglia assemblata abbia una probabilità elevata di rientrare nelle tolleranze totali ammesse. Per quelle griglie che non vi rientrano si prevede di lavorare a macchina utensili i risalci esterni d' che delimitano la chiave della griglia, fino ad una riduzione massima di spessore pari al 30%. Quelle griglie che neppure tale intervento porterebbe nel campo di tolleranza emerso, vengono scartate. E' evidente che l'ottimizzazione di questo enunciato necessita di un riscontro nei risultati delle prove di fabbricazione.

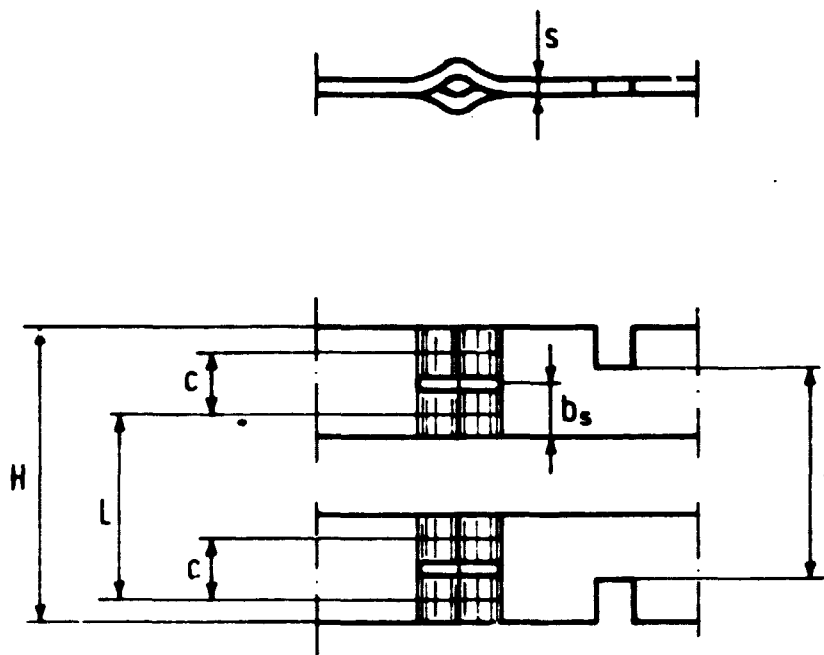


Fig. 16

5. CRITERI DI SCELTA DEI MATERIALI

Nella enumerazione dei criteri base della progettazione di una griglia è stata enunciata come caratteristica importante la necessità di realizzare gli "appoggi elastici" separati dalla struttura portante della griglia; questo per consentire l'impiego di materiali differenti. Infatti, l'intento di avere una bassa sezione di cattura neutronica ha orientato i progettisti a costruire la struttura della griglia in una lega di zirconio che, d'altra parte, non è affatto indicata per realizzare degli "appoggi elastici" a causa del suo basso modulo di elasticità, $7500 \div 8000 \text{ Kg/mm}^2$, a 300°C .

Per la realizzazione degli "appoggi elastici" ci si è orientati sulle leghe di nichel, quali l'Inconel 718 e Inconel X-750 oppure il Sancro 75-X. Tali leghe hanno caratteristiche meccaniche ottimali per realizzare molle che debbano resistere alla corrosione, all'irraggiamento, alle condizioni meccaniche di lavoro ed alle lavorazioni plastiche richieste per la realizzazione dell' "appoggio elastico". L'unica contro indicazione è la maggior sezione di cattura neutronica rispetto alle leghe di zirconio.

5.1 Leghe di zirconio.

Fra le tante leghe attualmente disponibili l'interesse dei progettisti si è orientato verso quelle di più largo uso commerciale, allo stato attuale di tecnologia, e cioè:

	Zr	Sn%	Cr%	Fe%	Ni%	Fe+Cr+Ni%	Fe+Cr%	O%
Zr.-2	resto	1,2÷1,7	0,05÷0,15	0,07÷0,20	0,03÷0,06	0,18÷0,38	-	0,09÷0,16
Zr.-4	resto	1,2÷1,7	0,07÷0,13	0,18÷0,24	-	-	0,28÷0,37	0,09÷0,16

Nella realizzazione della struttura della griglia si è posto subito il problema della scelta del materiale fra le leghe Zircaloy-2 e Zircaloy-4. Infatti, come già detto, tra le leghe possibili ci si è ridotti alle due sopra citate per ovvi motivi di mercato, in quanto altri tipi di leghe, quali Zr-Nb 2,5%, sono o allo stato sperimentale o comunque non hanno ancora raggiunto la piena maturità commerciale. Ritornando alla scelta tra Zircaloy-2 e 4, le considerazioni che hanno portato a preferire lo Zircaloy-4 sono le seguenti:

- il processo di idrurazione, dal punto di vista degli effetti meccanici, è più importante di quello ossidativo;
- l'assorbimento di idrogeno nello Zircaloy-2 è, fuori reattore, circa 3 volte superiore a quello nello Zircaloy-4; nelle condizioni operative dei reattori ad acqua bollente sembra, però, che tale differenza sia meno evidente, mentre ciò non si verifica nelle condizioni operative dei reattori ad acqua in pressione.

Nella tabella 1 sono riportate le caratteristiche meccaniche di una lamiera di Zircaloy-4 ricotta.

TABELLA I

Temp. °C	σ_R Kg/mm ²		$\sigma_{0.2}$ Kg/mm ²		Ar %		Durezza Vickers Hv10
	Long.	Trasv.	Long.	Trasv.	Long.	Trasv.	
R.T.	46.5	46.8	37.6	37.5	28	29	202
300	20	20.6	13.6	13	49	45	116

5.2 Leghe di nichel.

Per la realizzazione degli "appoggi elastici" ci si è orientati sulle leghe di nichel che, dopo trattamento termico, soddisfano ai seguenti requisiti di impiego meglio di altri:

- elevata resistenza meccanica;
- bassa sensibilità alla stress relaxation;
- ottima resistenza allo scorrimento viscoso;
- ottima resistenza alla corrosione in ambiente di acqua e vapore;
- ottima resistenza all'irraggiamento.

Tenendo conto di quanto sopra e della necessità di avere una buona reperibilità sul mercato del materiale nelle forme e nella quantità necessaria, la scelta si è ristretta ai tre seguenti tipi di lega:

- Inconel 718
- Inconel X-750
- Sanicro 75X

Nella tabella II sono riportati gli elementi chimici, con la relativa percentuale, che compongono queste tre leghe.

Nella successiva tabella III vengono riportate le caratteristiche fisiche, meccaniche e tecnologiche principali di tali leghe, ai fini del loro particolare impiego.

Dalla tabella III si nota che, per quanto riguarda il particolare impiego relativo alla griglia distanziatrice qui trattata, i tre materiali praticamente si equivalgono. Occorre precisare che l'Inconel X-750 è stato più sperimentato, assieme al suo equivalente Sanicro 75X, dell'Inconel 718 in campo nucleare. Ciò, associato alla disponibilità di mercato ed alla facilità o meno degli approvvigionamenti, può suggerire, di volta in volta, scelte differenti fra queste tre leghe.

TABELLA II

	Ni	Cr	Fe	Ti	Cb + Ta	Al	Mn	C	Cu	Si	S	P	Mo	Co	Nb
Inconel 718	50 ‡ 55	17 ‡ 21	resto	0.65 ‡ 1.15	4.75 ‡ 5.5	0.2 ‡ 0.8	0.35	0.08	0.03	0.35	0.015	0.015	2.8 ‡ 3.3	1	--
Inconel X-750	70	14 ‡ 17	5 ‡ 9	2.25 ‡ 2.75	0.7 ‡ 1.2	0.4 ‡ 1	1	0.08	0.5	0.5	0.01	--	--	1	--
Senicro 75X	72	16	7	2.5	--	0.7	0.55	0.03		0.35	--	--	--	--	0.9

TABELLA III

Caratteristiche	Temperatura °C	Inconel 718	Inconel X-750	Sanicro 75X	NOTE
σ_R $\frac{Kg}{mm^2}$	RT	85	91	87 ÷ 91	Lamiere lavorate a freddo e ricotte
	300			80	
$\sigma_{0,2}$ "	RT	40	37	25 ÷ 45	"
	300			31	
At %	RT	45 ÷ 50	20	45 ÷ 50	"
	300			40 ÷ 45	
σ_R $\frac{Kg}{mm^2}$	RT	130 ÷ 145	108	100 ÷ 135	Trattata secondo AMS 5596 C e AMS 5542 C
	300			110 ÷ 125	
$\sigma_{0,2}$ "	RT	125	96 ÷ 111	70 ÷ 96	"
	300			70 ÷ 90	
At %	RT	14 ÷ 20	15	20 ÷ 25	"
	300	20		21	
Modulo di Young Kg/mm^2	RT	20.300	21.700	21.000	
	300	18.800	20.200		
Modulo di torsione Kg/mm^2	RT	7.850	7.700		
	300				
Coeff. di Poisson	RT	0,29			
	300				
Comportam. sotto irragg.	--	--	ottimo	--	
Stress Relaxation	--	ottima	ottima	--	

segue

TABELLA III (segue)

Resistenza a corrosione	--	ottima	eccellente	--	
Sezione cattura neutronica termica cm ⁻¹	--	0.039	0.045	--	
Saldabilità al T I G	--	si	si	--	
Saldabilità a Resistenza	--	--	si	--	
Durezza	RT	180	--	162	Lamiere lavorate a freddo e ricotte
Hv10	300	143	--	157	
"	RT	--	--	400	Lamiere trattate termicamente
	300	--	--	372	
Comportamento a scorrimento (creep)	< 650	eccellente	ottimo	--	

6. SPECIFICHE DI APPROVVIGIONAMENTO E CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI

6.1 Lamiere in lega di nichel.

Il materiale viene ordinato nella condizione "lavorato a freddo e ricotto" secondo le seguenti specifiche standard:

- ASTM B168-63;
- AMS 5597 A;
- AMS 5596 B;
- AMS 5542 G.

Sul materiale, come ricevuto, vengono eseguite le seguenti prove di caratterizzazione meccanica:

a) prove di trazione; su tre provini per lotto secondo le norme ASTM E8,

con le seguenti modalità:

- su materiale, come ricevuto, nelle condizioni di temperatura ambiente ed a 300°C;
- su materiale trattato termicamente nelle condizioni di temperatura ambiente ed a 300°C.

Le prove devono fornire:

- la tensione di rottura (σ_r);
- la tensione di snervamento ($\sigma_{0,2}$);
- l'allungamento a rottura (A%).

b) dimensione dei grani; l'analisi deve essere condotta in conformità alle norme ASTM E112, solo a temperatura ambiente su materiale come ricevuto e trattato termicamente;

c) durezza; l'analisi deve essere eseguita sia a temperatura ambiente che a 300°C sul solo materiale trattato termicamente;

d) spessore della lamiera; il controllo sarà eseguito in modo continuo sulle due diagonali di tutti i fogli; nel caso di bandella il controllo sarà eseguito su tutta la lunghezza maggiore del manufatto;

e) rugosità; il controllo sarà eseguito nella direzione parallela a quella di laminazione ed in quella perpendicolare.

6.2 Lamiere in leghe di Zirconio.

Il materiale viene ordinato in condizione totalmente ricotta secondo la specifica TERM-RAL003 "Zirconium alloy sheet and strip".

Pur contenendo le specifiche di acquisto tutte le indicazioni necessarie affinché il fornitore invii una completa documentazione sulla caratterizzazione del materiale, è opportuno eseguire ugualmente un lavoro di caratterizzazione del materiale approvvigionato, sia per ragioni tecniche che fiscali. Il programma di prove è il seguente:

- a) corrosione acquosa secondo le norme ASTM G2;
- b) analisi metallografica;
- c) prove di trazione longitudinale e trasversale, sia a temperatura ambiente che a 300°C. Si richiedono: tensione di rottura (σ_r), tensione di snervamento ($\sigma_{0.2}$) e allungamento-rottura (A%). Le modalità di prova devono rispettare le norme ASTM E8 ed ASTM B352-64T;
- d) analisi del contenuto di idrogeno e di ossigeno;
- e) controllo dello spessore in modo continuo sulle due diagonali di ciascun foglio di lamiera oppure su tutta la lunghezza della dimensione maggiore della bandella;
- f) controllo della rugosità nella direzione di laminazione ed in quella perpendicolare;

7. TECNOLOGIE COSTRUTTIVE, VALUTAZIONI E CONTROLLI

7.1 Fabbricazione dei componenti.

I singoli componenti della griglia, paratie interne ed esterne ed "appoggi elastici", vengono interamente realizzati per tranciatura e piegatura.

Non è il caso di dettagliare questa fase di lavoro in quanto, venendo le griglie costruite a livello di prototipi ed in numero limitato, non è possibile intervenire nei dettagli della fabbricazione poiché la ditta che si aggiudica la gara di appalto relative alla costruzione dei singoli componenti della griglia (paratie interne ed esterne, "appoggi elastici"), progetta le attrezzature non solo in funzione delle macchine utensili che ha a disposizione ed alla sua esperienza di stampaggio, ma anche in base alla necessità di usare un sistema più economico per produrre un limitato numero di esemplari. E' evidente che per un'azienda, che produce componenti di elementi di combustibile per ricerche di reattori di potenza, il processo di fabbricazione assume altri aspetti e perciò è affrontato con metodologie e tempi tipici di una produzione di media o grande serie.

7.2 Controlli.

Il controllo dimensionale dei singoli componenti della griglia, con riferimento ai disegni di progetto, è a carico della ditta costruttrice e viene eseguito alla presenza di un esperto della Divisione TERM/RAL. Inoltre, presso il CNEN vengono eseguiti i controlli ed i trattamenti termici seguenti:

a) sui componenti in lamiera di Zircaloy:

- prove di corrosione fuori pile al fine di accertare il comportamento dei componenti realizzati con procedimenti di tranciatura e di piegatura. L'indagine si articola in due tipi di prove. Il primo tipo, esegui

to secondo le norme ASTM G2, rappresenta una presa di contatto col problema al fine di avere delle prime valutazioni indicative sul comportamento del materiale lavorato; la prova viene effettuata con le stesse modalità con cui viene effettuata la prova di collaudo a corrosione della lamiera di Zircaloy come ricevuta; la prova viene quindi eseguita su campioni provenienti dai componenti ottenuti dalla messa a punto degli stampi di lavorazione ed il risultato serve o a dare il via alla produzione dei componenti stessi o a rivedere le attrezzature di stampaggio o, al limite, a rivedere il progetto della griglia stessa. Il secondo tipo è una prova tecnologica che viene eseguita direttamente sui componenti provenienti d lla produzione; questa prova viene eseguita conseguentemente all'esito positivo della prima prova ed effettuata nelle condiziori di esercizio del reattore e per tempi significativi al fine dell'extrapolazione ai tempi di permanenza in reattore;

- idrogenazione dei componenti in lamiera di Zircaloy nelle zone in cui sono stati ricavati gli "appoggi rigidi"; le prove saranno eseguite su opportuni campioni, provenienti dalle paratie in cui sono stati ricavati i due tipi di "appoggio rigido", posti sotto sforzo ed idrurati; la forza con cui agire sugli appoggi deve essere tale che lo stato tensionale che ne deriva sia uguale a quello esistente nelle condizioni di esercizio in reattore; l'idrurazione viene eseguita ad una temperatura non superiore ai 350°C e per una quantità compresa tra i 100 ed i 200 ppm; la successiva analisi metallografica ha il compito di valutare le orientazioni assunte dalle placchette di idruro in rapporto alla resistenza meccanica degli "appoggi rigidi" stessi;
- metallografia; gli "appoggi rigidi" vengono esaminati al microscopio in diverse sezioni trasversali e longitudinali ed in special modo nelle zone ove maggiore è la deformazione causata dalle operazioni di piegatura; ciò al fine di valutare le tessiture prodotte e gli eventuali

danneggiamenti alla struttura del materiale;

- rugosità; le specifiche di progetto prevedono per gli "appoggi rigidi" una rugosità non superiore a 32 RMS mentre per le bugne esterne non superiore a 63 RMS. La lamiera di Zircaloy è approvvigionata con una rugosità non superiore a 63 RMS, per cui devono essere lucidati fino ad un massimo di 32 RMS solo gli "appoggi rigidi"; le bugne esterne saranno portate ad un massimo di 32 RMS solo nel caso in cui le operazioni di piegatura avessero alterato il primitivo valore della rugosità; il controllo viene eseguito su ognuna di queste parti.

U sui componenti in lamiera di lega di nichel:

- trattamento termico; viene eseguito sugli "appoggi elastici" finiti, cioè dopo saldatura e sgrassaggio in trielina ed asciugatura in aria calda; il trattamento serve ad aumentare le caratteristiche meccaniche del materiale ed è eseguito secondo le specifiche AMS 5596 C oppure 5597 A per l'Inconel 718 e secondo le specifiche AMS 5542 G per l'Inconel X-750 e Sanicro 75X.

7.3 Prova di durezza.

Su alcuni elementi elastici, presi casualmente, viene effettuata la prova di durezza secondo le norme ASTM E 92 al fine di controllare la qualità del trattamento termico. Il valore rilevato deve essere intorno a 400 HV10.

7.4 Finitura.

Gli elementi elastici, dopo trattamento termico, vengono lucidati per pallinatura sia per abbassare la rugosità nella zona di contatto con le barrette, sia per avere le superfici, che vanno a contatto per la saldatura a resistenza, esenti da qualsiasi deposito o altro. Il controllo della rugosità deve dare valori inferiori a 32 RMS.

8. ASSEMBLAGGIO E OPERAZIONI DI FINITURA

8.1 Decapaggio iniziale.

Prima dell'operazione di saldatura è indispensabile che tutti i componenti in Zircaloy-4 vengano decapati con la seguente miscela:

- acido nitrico: 45% vol.
- acido fluoridrico: 10% vol.
- acqua: 45% vol.

per una durata di 5-10 secondi seguita da immediato lavaggio con acqua e successivamente con alcool etilico; infine, si asciuga con aria calda.

8.2 Saldatura.

Gli elementi elastici vengono accoppiati a due a due e saldati a resistenza o all' "electron beam" alle due estremità. I componenti decapati sono pronti per essere montati sulla "maschera di saldatura" opportunamente progettata per soddisfare i seguenti requisiti:

- rispettare tutte le tolleranze di assieme, tenendo conto degli opportuni ritiri;
- creare un opportuno raffreddamento dei giunti saldati;
- permettere la saldatura dei singoli giunti senza determinare una contaminazione tra bagno di saldatura ed il materiale con cui è costruita la maschera.

E' evidente che l'ideale di saldatura di serie è rappresentato dalla saldatura al TIG in quanto permette di fare molte saldature contemporaneamente ed a tempi di realizzazione più piccoli rispetto alla saldatura con "electron-beam". Per contro occorre dire che la saldatura al TIG, affinché dia risultati equivalenti a quelli ottenibili con "electron-beam", necessita di un'attrezzatura progettata ad "hoc", attrezzatura che ha senso realizzare solo in produzione di serie, dato l'elevato costo.

A livello di laboratorio di ricerca quando si può avere a disposizione un "electron-beam" è senz'altro più conveniente utilizzare questa ultima in quanto l'obiettivo che ci si propone non è quello di fare della ricerca sulla saldatura dello Zircaloy (tecnologie già acquisite nel campo nucleare) ma quello sul comportamento della griglia progettata, che è l'oggetto della presente ricerca. Di conseguenza questa tecnica, dando ottimali garanzie di qualità, permette di ridurre i problemi da investigare ed è, inoltre, nella nostra situazione, di maggiore economicità. D'altra parte nella fase di ottimizzazione della fabbricazione, successiva all'attuale fase di messa a punto delle funzioni della griglia, la saldatura a TIG verrà adeguatamente messa a punto nell'ottica, come già detto, che questa sarà la tecnica impiegata a livello di produzione industriale.

8.3 Decapaggio finale.

Le griglie finite vengono decapate per immersione in una miscela costituita da:

- acido cloridrico: 45% vol.
- acido fosforico: 10% vol.
- acqua: 45% vol.

La durata del decapaggio è brevissima (2-3 sec.) e l'operazione è immediatamente seguita da un lavaggio abbondante e prolungato in acqua corrente. Segue un lavaggio in alcool etilico e infine si asciuga con aria calda.

8.4 Autoclavaggio.

L'impiego dell'autoclavaggio come sistema protettivo della corrosione in reattore è un argomento molto dibattuto. E' certo, però, che quando non si è in possesso di una perfetta tecnica di fabbricazione, come nel presente caso, trattandosi di prototipi, è sempre conveniente fare l'autocla-

vaggio in quanto esso può essere utilizzato anche come controllo di massima di qualità.

L'autoclavaggio è effettuato in vapore surriscaldato a 400°C e 150 ata per 14 ore ed il film di ossido deve presentarsi di un colore nero lucido e uniforme.

9. COLLAUDO

Normalmente il collaudo di manufatto finito è realizzato controllando il rispetto delle quote come risultano dal disegno di assieme, a parte il controllo delle tecnologie di fabbricazione impiegate che può intervenire prima o dopo l'assemblaggio secondo necessità.

L'intento dei progettisti è di modificare questa linea di tendenza e questa esigenza è nata dalla complessità di un tipo di controllo convenzionale. Infatti ad un controllo di verifica delle condizioni dimensionali e geometriche si vuole sostituire un controllo funzionale: cioè verificare che l'assemblato soddisfi i criteri informativi del progetto e che questo si possa effettuare con sistemi semplici e di rapido impiego. Il rispetto dei criteri informativi del progetto è stato tradotto in 4 controlli che sono:

- interasse delle maglie: inteso come distanza degli assi di barrette di diametro nominale inserite dentro ogni maglia;
- inclinazione delle maglie: intesa come l'inclinazione dell'asse di una barretta di diametro nominale inserita dentro ogni maglia rispetto al piano trasversale di appoggio della griglia;
- forza esercitata dalle molle: intesa come rilevamento della forza applicata dalla molla su ogni barretta di diametro nominale inserita dentro ogni maglia;
- geometria della chiave esterna della griglia con relativa dimensione riferita ad una qualsiasi parete e al piano di appoggio della griglia stessa, piano coincidente con quello utilizzato per il rilevamento dell'inclinazione delle maglie.

Per la realizzazione di questi controlli vengono proposte a grandi linee le tecniche che seguono.

9.1 Interasse ed inclinazione delle maglie.

La realizzazione di questo controllo è prevista su un banco ottico-me^utrologico inserendo dentro ad ogni maglia dei cilindretti rettificati di diametro uguale a quello nominale delle barrette di combustibile. Il cilindret-

to (vedi fig. 17) di altezza pari a quella della griglia avrà alloggiato sulle due estremità e in mezzeria dei vetrini con crocicchio centrale. Il controllo degli interassi verrà realizzato leggendo sul banco metrologico la distanza fra due crocicchi contigui, crocicchi corrispondenti ai vetrini centrali e opportunamente focalizzati per la visione nell'oculare del banco.

Il controllo dell'inclinazione viene effettuato per ogni maglia collimando il crocicchio dell'oculare del banco con il crocicchio del vetrino superiore del cilindretto e, con opportuna focalizzazione, andando a leggere la posizione del crocicchio posto all'altra estremità del cilindretto sullo schermo graduato dell'oculare rispetto a quello superiore.

9.1.1 Posizionamento della griglia per i due controlli sul banco metrologico.

La griglia viene montata sul banco tramite un piano basculante. Vengono inseriti tutti i cilindretti nelle maglie portandoli a battuta sul piano basculante. Viene posizionato il piano in maniera da avere tutti i crocicchi centrali dei cilindretti sullo stesso piano focale. Così la griglia è pronta per il controllo degli interassi.

Per il controllo dell'inclinazione delle maglie si posiziona il piano in modo da collimare l'asse di un cilindretto con l'asse ottico del banco. Le misure saranno, quindi, tutte riferite a quella maglia della griglia.

9.2 Controllo della forza applicata dalla molla.

Viene realizzato sempre con un cilindretto (vedi fig. 18) di diametro uguale a quello nominale della barretta di combustibile. Nella parte centrale del cilindretto ed in posizione da contrapporsi al punto di contatto dell'elemento elastico con la barretta è alloggiata una "cella di carico" che serve a rilevare la forza applicata dallo stesso elemento elastico sulla barretta.

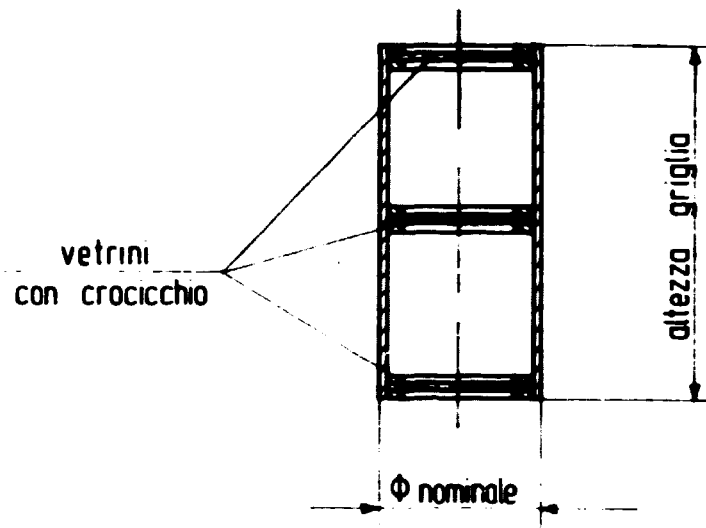


Fig. 17 - Barilotto per controllo interassi e inclinazione maglia

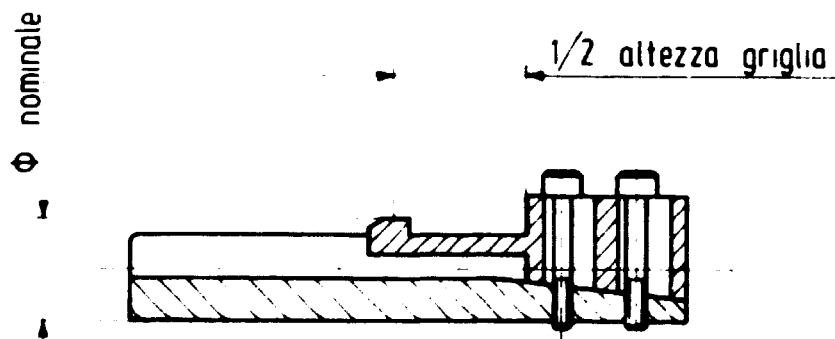


Fig. 18 - Cella di carico per rilevamento forza esercitata dall'elemento elastico

4.3 Geometria della chiave esterna e relative dimensioni.

La realizzazione di questo controllo è prevista con una macchina di misura tridimensionale. Il controllo di parallelismo fra le bugne esterne e gli assi delle maglie della griglia non deve essere fatto in quanto questo controllo è insito nel controllo dell'inclinazione dei cilindretti sulle file esterne di maglie.

BIBLIOGRAFIA

- (1) "Calcolo degli effetti di reattività connessi con l'uso di griglie di materiali diversi ed aventi diverse geometrie in reattori ad acqua leggera bollente" - Documento di Lavoro Riservato - TERM/RAL - CNEN
- (2) "Attività di promozione industriale nel campo dei reattori provati"
- Proposte operative formulate dallo staff di tecnici diretti da Giancarlo Schileo.

