

PRESENTAZIONE DEL GRUPPO CASALE

ai Seminari di Ingegneria Chimica 1999

Università di Napoli "Federico II"

29 Aprile, 1999

**Sviluppi Innovativi
nella Produzione di Formaldeide
da Metanolo**

G. Sioli

Direttore Tecnico

AMMONIA CASALE S.A.

E:\paper\conferences\chemicals\napoli 99.doc

PRESENTAZIONE DEL GRUPPO CASALE

ai Seminari di Ingegneria Chimica 1999

Università di Napoli "Federico II"

29 Aprile , 1999

**Sviluppi Innovativi
nella Produzione di Formaldeide
da Metanolo**

**G. Sioli
Direttore Tecnico
AMMONIA CASALE S.A.**

1. Premessa

Il Gruppo gestito dalla Holding Ammonia Casale comprende quattro società attive nel settore dell'ingegneria chimica, molto attente all'innovazione tecnologica. Questo fatto contraddistingue il modo di operare delle società, che dedicano annualmente risorse sostanziali per Ricerca e Sviluppo.

La società Ammonia Casale è stata fondata nel 1921 a Lugano, Svizzera, dal Dottor Luigi Casale, un tecnico italiano in cerca di credibilità economica per il suo processo di sintesi catalitica dell'ammoniaca, che introduceva sostanziali miglioramenti rispetto al processo tedesco messo a punto in quegli anni da Haber and Bosh, essendo il primo a produrre ammoniaca anidra, anzichè soluzione acquosa ammoniacale.

Va detto che oggi più di un terzo dei 125 milioni di tonnellate di ammoniaca prodotta a livello mondiale è sintetizzata usando la tecnologia di Ammonia Casale. Lo stesso può dirsi per la sintesi del metanolo, introdotta da Luigi Casale nel 1928, ed in seguito perfezionata fino a costituire oggi circa il 30% della produzione mondiale di 24 milioni di tonnellate/anno.

Queste moderne tecnologie di sintesi dell'ammoniaca e del metanolo costituiscono il risultato di raffinati esercizi di ingegneria chimica. Per ognuna di esse il punto nodale è costituito dalla progettazione del reattore chimico.

L'ingegneria dei reattori chimici comprende un vasto numero di argomenti, partendo dalla valutazione dei dati di velocità di reazione e dalla comprensione di quanto essi siano condizionati da fenomeni di trasporto di materia e di calore, per passare ai problemi di rimozione del calore di reazione, di soppressione delle reazioni secondarie, di configurazione del sistema di controllo, di selezione dei materiali per la costruzione e di progettazione meccanica del reattore.

In conseguenza di ciò, quando si affrontano i problemi di progettazione ed operatività dei reattori chimici sono da considerare simultaneamente fenomeni chimici e fisici, scienza dei materiali, tecniche di costruzione, oltre a fattori economici e di sicurezza.

Durante gli ultimi due decenni l'ingegneria dei reattori chimici ha fatto grandi passi in avanti, trasformandosi da una sorta di arte empirica, dove predominava il buon senso tecnico, in una disciplina razionalizzata.

La società Ammonia Casale, società-madre del Gruppo Casale, ha avuto la rara opportunità di poter seguire, per quasi 80 anni, l'intera evoluzione storica di questa attività multidisciplinare. E' interessante, ad esempio, riandare con la Fig.1.1 a questi primordi di una disciplina come l'ingegneria chimica, allora del tutto sconosciuta come tale. Si tratta di uno dei primi schemi storici di impianto di sintesi dell'ammoniaca, tratto dal nostro archivio degli anni '20.

Interessante la Fig.1.2, anno 1923, dove viene mostrato uno dei primi reattori industriali Casale per alta pressione: è un'epoca in cui la limitazione alle condizioni operative veniva dettata dalla resistenza dei materiali reperibili, o dalla capacità delle officine di lavorare, o talvolta solo di sollevare e spostare recipienti di certe dimensioni.

Riferendoci poi alla realizzazione pratica degli impianti, il mercato delle apparecchiature specializzate si è sviluppato solo negli ultimi decenni. Prima di allora la società si costruiva i propri reattori, i compressori, le valvole, e produceva i propri catalizzatori.

Oggi la progettazione dei reattori è generalmente supportata da un'informazione abbastanza completa riguardante la chimica del processo, le caratteristiche dei catalizzatori, i dati cinetici, i dati di trasferimento di massa e di calore, la meccanica dei fluidi, i materiali da costruzione, l'analisi dei costi.

Ora gli ingegneri possiedono strumenti sofisticati, capaci di indagare, analizzare e descrivere fenomeni complessi ben al di là di come possibile al più smaliziato calcolatore manuale. Mi riferisco evidentemente alle tecniche assistite da elaboratore elettronico, con applicazioni che ormai vanno dalla simulazione del processo chimico alle analisi di dinamica dei fluidi o di sollecitazione dei materiali.

Possiamo vedere qui un esempio tipico di approccio odierno alla progettazione di un dettaglio proprio di un reattore chimico: la Fig. 1.3 mostra l'impostazione di un reticolo di elementi finiti appartenenti alla sezione di fondo di un reattore, dove i differenti colori indicano differenti materiali. La successiva Fig. 1.4 mostra una simulazione della distribuzione di temperatura nello stesso elemento di apparecchiatura durante l'esercizio normale. La Fig. 1.5 è poi l'analisi delle tensioni meccaniche in una giunzione tubolare appartenente allo stesso dettaglio già visto.

Questi sono alcuni dei metodi di indagine attualmente usati dai nostri uffici tecnici, con i quali abbiamo potuto affrontare e risolvere problemi di varia complessità, ivi inclusa la messa a punto di nuove tecnologie. La sintesi di Formaldeide da Metanolo, che sarà ora illustrata, rappresenta uno dei risultati recentemente conseguiti.

2. Formaldeide da Metanolo, il problema fondamentale

La Formaldeide è un prodotto chimico di base, che per la maggior parte viene utilizzato nella produzione di resine termo-indurenti, principalmente impiegate nell'industria dei derivati del legno (incollaggio di legni compensati, pannelli truciolari, ecc).

Quasi tutta la Formaldeide prodotta è ottenuta da Metanolo. Una stima della produzione mondiale porta a circa 24 milioni di tonnellate/anno (considerata come soluzione acquosa standardizzata al 37%) prodotte in circa 300 impianti. Si tratta del principale derivato del Metanolo, come si nota in Fig. 2.1, tutt'ora in crescita a livello del 4.5% all'anno.

Due sono i processi di produzione in competizione: il primo, praticato in Germania fin dal 1908, è basato sull'uso di catalizzatore d'argento; il secondo, pur brevettato nel 1933, è stato praticato industrialmente solo dagli anni '50 e si basa su catalizzatore costituito da Ferro Molibdato.

I due processi si basano su differenti reazioni: nel primo caso la produzione di Formaldeide è dovuta a deidrogenazione endotermica del Metanolo:



L'aggiunta di una piccola quantità di aria sposta l'equilibrio verso destra e fornisce calore di reazione:

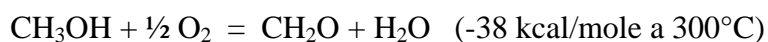


Il processo si svolge in modo adiabatico, in un campo di temperature fra i 600 ed i 650°C, in reattori in cui un sottile letto di cristalli d'Argento è posto su una rete di supporto in Argento ed è attraversato verticalmente, dall'alto verso il basso, dal flusso di gas in reazione. La distribuzione del gas deve essere molto accurata, per evitare zone di surriscaldamento locale, che portano alla totale degradazione dei prodotti ed anche distruzione del catalizzatore.

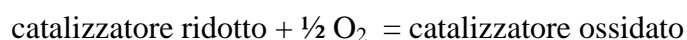
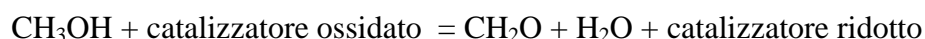
La conversione del Metanolo è praticamente completa (supera il 98%), con una resa molare in Formaldeide intorno all'87-88% per impianti nelle migliori condizioni operative. Il consumo specifico di Metanolo si pone a 0.45 t/t di soluzione standard di Formaldeide al 37%.

Il principale sottoprodotto di reazione è il CO, che si forma per decomposizione termica della Formaldeide, reazione favorita alle alte temperature. Per questa ragione la fase gassosa uscente dal catalizzatore deve essere immediatamente raffreddata al disotto dei 150°C in un tempo di 0.1-0.3 secondi, il che costituisce un problema ingegneristico abbastanza rilevante. Solitamente si produce vapore a bassa pressione.

Nel secondo caso la trasformazione del Metanolo in presenza di Ossigeno:



implica un meccanismo di interazione del Metanolo e dell'Ossigeno con il catalizzatore allo stato ossidato e, rispettivamente, ridotto:



Il processo si svolge in reattori di tipo pseudo-isotermo, in un campo di temperature fra i 230 ed i 380 °C. Il catalizzatore, generalmente in forma di anelli, è posto all'interno di tubi, all'esterno dei quali è presente un fluido atto a rimuovere il calore di reazione, come vedremo più avanti. Anche in questo caso la conversione del Metanolo è praticamente completa, con resa molare in Formaldeide dell'ordine del 90%. Il consumo specifico di Metanolo si pone a 0.43 t/t di soluzione standard di Formaldeide al 37%.

Durante l'ultima decade non sono apparsi nuovi processi, ma si è continuato ad affinare i due processi già praticati.

Il maggior fattore di costo, nella produzione della Formaldeide, è il consumo specifico di Metanolo, che contribuisce per almeno due terzi al costo totale di produzione. Per l'economia del processo è quindi importante raggiungere elevati valori di conversione del Metanolo e di selettività di reazione verso la Formaldeide.

Come si è visto, la resa in Formaldeide, per il processo al catalizzatore d'Argento, è inferiore a quella del processo al Ferro Molibdato. La scelta del processo risulta tuttavia legata anche ad altri fattori, talora storici, talora strategici. Negli ultimi decenni l'industria si è prevalentemente orientata verso il processo al Fe-Mo.

Ultimamente si è posto un nuovo problema: gli utilizzatori di resine basate sulla Formaldeide stanno cambiando ordine di grandezza della scala produttiva, richiedendo nuove linee capaci di produrre fino a 200.000 t/a di Formaldeide (37%). Reattori al catalizzatore d'Argento sono già stati realizzati con capacità relativamente grande, fino a 80.000 t/a, e si prestano ad essere costruiti in scala anche maggiore, mentre esistono forti limitazioni costruttive per i reattori tubolari con catalizzatori al Fe-Mo, che hanno raggiunto un massimo di 40.000 t/a per singola unità.

Si imponeva quindi un riesame delle basi tecnologiche dei processi di ottenimento della Formaldeide, con lo scopo di soddisfare le nuove esigenze industriali.

3. Il processo al Ferro Molibdato

Casale ha posto l'attenzione sulle possibilità di miglioramento e di applicazione in grande scala del processo al Fe-Mo, sia per la possibilità di rendimenti migliori, che per la sua maggiore diffusione ed accettazione nell'industria.

Nella sua configurazione più recente, il processo si svolge come illustrato dallo schema di principio in Fig. 3.1.

Il Metanolo viene evaporato ed introdotto nella corrente di gas che una soffiante alimenta al reattore.

Le concentrazioni dei reattivi, Metanolo ed Ossigeno, sono limitate a valori tali da evitare la formazione di miscele gassose infiammabili; non superano, rispettivamente, il 7-9% e l'8-10% in volume.

Il flusso gassoso così ottenuto (il cui principale componente è Azoto) viene preriscaldato per scambio termico con il gas proveniente dalla reazione e giunge al reattore a circa 220°C.

Il prodotto di reazione contenente Formaldeide giunge ad una torre di assorbimento, alla cui testa si alimenta acqua. La Formaldeide viene così trasferita in fase liquida ed esce dal fondo della torre a concentrazioni comprese fra il 37 ed il 55% in peso, in funzione delle applicazioni. La dissoluzione della Formaldeide sviluppa calore, che viene rimosso attraverso refrigeranti di cui la torre è provvista.

Il gas, privato della Formaldeide, ritorna alla soffiante di ricircolazione.

L'Ossigeno consumato dalla reazione viene compensato da introduzione di aria nel ciclo. L'azoto introdotto con l'aria viene spurgato dal ciclo con parte del gas riciclante: lo spurgo viene regolato in modo da controllare la concentrazione di Ossigeno al valore desiderato.

Il gas di spurgo viene trattato in modo opportuno, prima di essere rilasciato all'atmosfera: il contenuto di sostanze organiche e di monossido di carbonio viene abbassato al disotto dei limiti ammessi dai regolamenti ambientali mediante ossidazione catalitica.

4. Il reattore tubolare

Lo stato dell'arte dei reattori con catalizzatore al Fe-Mo si basa su apparecchi configurati come fasci tubieri verticali, del tipo raffigurato in Fig. 4.1. Il catalizzatore, generalmente in forma di anelli, è sistemato all'interno di tubi verticali di diametro interno da 16 a 21 mm e lunghezza di circa un metro, percorsi dai gas in reazione nel senso dall'alto al basso. In figura si può notare il particolare della piastra tubiera superiore del reattore, alla quale sono saldate varie migliaia di tubi, riempiti di catalizzatore.

La reazione è molto esotermica; il calore generato viene rimosso da un fluido circolante all'esterno dei tubi catalitici. Questo mezzo di asportazione del calore, che opera fra i 270 ed i 330°C, è solitamente una miscela eutettica di sali fusi, o un composto difenilico bollente. Meno frequentemente un olio diatermico capace di essere stabile alla temperatura del sistema. Si tratta in ogni caso di fluidi abbastanza problematici dal punto di vista ingegneristico, anche per ragioni di sicurezza. La produzione diretta di vapore è resa impossibile dal carico termico elevato dell'unità di superficie di scambio, che porterebbe a fenomeni di calefazione, cioè di formazione di un film gassoso lato vapore, con crollo del coefficiente di scambio termico.

La Fig. 4.2 illustra le tre alternative normalmente praticate per la rimozione del calore da reattori di questo tipo.

Negli apparecchi di minori dimensioni (Fig. 4.2.A) si impiegano sali fusi, mantenuti in circolazione, all'esterno dei tubi, da una pompa assiale. Nei sali è immerso un serpentino di adeguata superficie, all'interno del quale si genera vapore, reso disponibile da un recipiente di separazione posto superiormente al reattore.

Aumentando le dimensioni, risulta poco conveniente alloggiare la generazione di vapore all'interno del reattore: come in Fig. 4.2.B, i sali fusi, o l'olio diatermico, vengono mantenuti in circolazione fra il reattore ed un generatore di vapore da una pompa esterna.

Per i reattori di maggiori dimensioni, risultando difficoltoso ottenere una buona distribuzione della circolazione su grandi diametri, si preferisce ricorrere alla soluzione di Fig. 4.2.C, in cui un prodotto organico all'ebollizione sottrae il calore per evaporazione, trasportandolo al generatore di vapor d'acqua, dove condensa.

In tutti i casi viene generato vapore a media pressione (12-15 bar).

Il calore generato dalla reazione viene rimosso, come si è detto, attraverso la superficie dei tubi catalitici. Tuttavia il bilancio termico nelle varie sezioni poste lungo l'asse di ogni tubo, determinato rispettivamente dalle velocità di generazione e di rimozione del calore, varia progressivamente.

Ne risulta, in condizioni stazionarie, il tipico profilo termico di Fig. 4.3: nella parte iniziale del tubo il gas viene ulteriormente pre-riscaldato da parte del fluido diatermico esterno, relativamente più caldo; la reazione quindi ha inizio spontaneamente, generando una grande quantità di calore, che innalza la temperatura fino ad un valor massimo (punto caldo), determinato dal relativo esaurimento della reazione stessa e dal prevalere della rimozione di calore, rispetto alla generazione.

Gli svantaggi di questo tipo di reattore sono per lo meno i seguenti:

- la necessaria presenza di un fluido intermedio per il trasporto del calore;
- l'importanza dell'uniformità nel caricamento del catalizzatore: differenze di densità del letto fra tubo e tubo portano ad una disuniformità di distribuzione del flusso gassoso, e quindi di profilo di temperatura fra i vari tubi, con risultati di conversione e selettività diversi ed incontrollabili. Le disuniformità di caricamento sono legate al rapporto relativamente modesto (4-5) fra il diametro interno dei tubi ed il diametro delle particelle di catalizzatore;
- la presenza dei "punti caldi" localizzati, dove predominano le reazioni secondarie (degradazione della Formaldeide a CO) e la disattivazione del catalizzatore (migrazione dell'Anidride Molibdica);
- aumento delle perdite di carico del gas attraverso il catalizzatore, dovuto al già citato fenomeno di disattivazione del catalizzatore, accompagnato da una aggregazione locale delle particelle;
- limitazione di dimensioni del reattore, dovuta alle difficoltà costruttive, che aumentano con il numero di tubi da installare;
- elevato costo del reattore: la garanzia di tenuta delle migliaia di tubi, nella loro saldatura alle piastre tubiere, richiede sofisticate tecniche di esecuzione e di controllo. La pericolosità intrinseca dovuta ad eventuali perdite di fluido diatermico verso il lato di processo aumenta se si usano fluidi organici, come accade proprio nei reattori di maggiori dimensioni.

5. Il reattore a stadi adiabatici

Nella versione innovativa proposta da Casale, il reattore di produzione della Formaldeide è di tipo a stadi catalitici adiabatici. Concettualmente si tratta di far avvenire la conversione del Metanolo in porzioni successive, come schematizzato in Fig. 5.1.

La composizione del gas alimentato al reattore è del tutto simile a quella già vista per i reattori tubolari. La temperatura di alimentazione è tale che la reazione abbia inizio spontaneamente.

In ogni stadio il grado di avanzamento della reazione viene limitato dal volume di catalizzatore presente. In modo corrispondente, in assenza di rimozione del calore generato, si limita l'incremento adiabatico di temperatura.

A valle di ogni stadio la massa gassosa reagente viene raffreddata, riportando la temperatura ad un valore tale che la reazione riprenda spontaneamente nello stadio successivo.

Il problema fondamentale di un reattore per l'ossidazione del Metanolo a Formaldeide, reazione esotermica relativamente veloce, è un efficace controllo della temperatura, che eviti l'innescò di reazioni secondarie. La reazione può facilmente sconfinare in area di sensibilità, ovvero in condizioni per cui una variazione anche modesta di uno qualsiasi dei parametri che controllano il suo regime ne provoca l'allontanamento da questo stato per raggiungere un nuovo stato relativamente molto discosto dal precedente, correlato in modo univoco all'entità della variazione assegnata, ma a volte inaccettabile per i risultati del processo. Il profilo di temperatura già visto in Fig. 4.3 per i reattori tubolari è tipico per un sistema sensitivo.

In uno stadio adiabatico il controllo è delegato alla uniforme distribuzione del gas attraverso il letto catalitico ed alla costanza di caratteristiche termiche e chimiche del letto stesso. Tuttavia è possibile intervenire sul sistema catalitico per riportare la sua sensibilità parametrica entro limiti accettabili. Questa possibilità è stata oggetto di particolari indagini da parte di Casale, che ha ri-progettato un catalizzatore di Fe-Mo adatto allo scopo.

Si è trattato, in particolare, di agire in due direzioni:

- impartire al catalizzatore una pronunciata reattività a bassa temperatura, in modo che la partenza spontanea della reazione avvenga in condizioni di velocità contenuta.
- controllare le condizioni diffusive così che l'energia di attivazione apparente della reazione sia relativamente bassa.

La ricerca ha condotto al risultato desiderato: si è messo a punto un catalizzatore tale che eventuali variazioni transitorie di temperatura, di concentrazione del Metanolo o di portata del gas, quali si possono verificare nella pratica industriale, generalmente riconducibili all'intervento degli organi di regolazione automatica, provocano allontanamenti sensibili, ma accettabili dalle condizioni di regime, alle quali il sistema può essere ricondotto dagli stessi organi di regolazione.

Le prove di controllo delle varie preparazioni di catalizzatori sono state eseguite mediante l'impianto pilota da laboratorio di Fig. 5.2. E' costituito da un recipiente contenente un cestello carico di catalizzatore, preceduto da un sistema di preparazione, dosaggio e preriscaldamento del gas di processo, costituito da Metanolo, aria ed azoto. Il cestello, di diametro 100 mm ed altezza massima del letto catalitico di 300 mm, è munito di un certo numero di termocoppie per lo studio della distribuzione delle temperature e di sensori di pressione e pressione differenziale. Un sistema di acquisizione dei dati permette di registrare i valori dei parametri operativi e dei loro andamenti in periodi sufficientemente estesi.

6. Realizzazione pratica del reattore adiabatico

Le premesse concettuali di cui al capitolo precedente hanno preso forma nel reattore schematizzato in Fig. 6.1, che raccoglie molte delle esperienze Casale nella progettazione di reattori a letto fisso.

Il gas contenente Metanolo ed Ossigeno entra nella parte alta del reattore, che è un recipiente cilindrico verticale, e si distribuisce alla periferia esterna del primo cestello contenente il catalizzatore, a forma di cilindro cavo. Il flusso gassoso attraversa quindi il letto catalitico, raccogliendosi in un annulus alla periferia interna del cestello. Da qui entra, attraverso una finestra, nel mantello del fascio tubiero di raffreddamento. Percorsa una prima sezione del fascio, il gas ritorna alla periferia esterna del reattore, distribuendosi attorno al cestello che costituisce il secondo stadio catalitico.

Il processo si ripete finchè, a valle del quarto stadio, il gas si raccoglie nella parte centrale del reattore, attraversando poi l'ultimo cestello, in direzione dall'interno all'esterno, ed uscendo infine dal reattore.

Il fascio tubiero è percorso da acqua di caldaia, dal basso verso l'alto, in circolazione naturale favorita dallo svolgimento di vapore.

La regolazione di temperatura del gas in ingresso ad ogni stadio è effettuata mescolando al gas di processo raffreddato, proveniente dal fascio tubiero interno, una porzione adeguata di gas caldo, prelevata dallo stadio precedente, come indicato in figura.

Il profilo tipico delle temperature rilevabili attraverso la serie di letti catalitici è in Fig. 6.2. Si noti come il sistema sia meglio controllabile di quanto non avvenga con un convenzionale reattore tubolare. Ciò si traduce in una migliore selettività di reazione ed in un aumento considerevole della vita utile del catalizzatore.

La realizzazione pratica di un cestello catalitico del tipo qui usato è caratteristica anche per altri reattori a letto fisso progettati da Casale: come si nota in Fig. 6.3, il catalizzatore è sistemato fra due pareti cilindriche aventi caratteristiche costruttive tali da distribuire il gas con grande uniformità su tutta la periferia. Il gas attraversa quindi il letto catalitico prevalentemente in senso radiale. La sezione superiore del cestello è aperta, cosicchè una parte del flusso gassoso penetra nel letto anche assialmente. Questa configurazione del flusso, cosiddetta "assial-radiale", costituisce una soluzione tecnologica tipica ed originale della Ammonia Casale, che ha il vantaggio di utilizzare totalmente la massa catalitica.

I cestelli possono essere facilmente rimossi, in modo separato l'uno dall'altro, dal reattore. Il loro caricamento è indubbiamente assai semplificato rispetto a quanto richiesto dai reattori di tipo tubolare.

E' interessante, a questo punto, mostrare i risultati di una simulazione fluidodinamica relativa allo studio di un cestello, anche per sottolineare quali strumenti siano oggi a disposizione del progettista. I dati in Fig. 6.4 si riferiscono alla parte superiore di un cestello catalitico. Sono espressi mediante due versioni grafiche: la prima mostra i contorni di zone di flusso di pari portata, individuandone i valori con la colorazione dei contorni stessi, nella seconda i colori campiscono le correnti di flusso, indicandone il valore.

Simulazioni matematiche della cinetica di reazione, appositamente realizzate, permettono di indagare sul dimensionamento ottimale dei letti catalitici.

La Fig. 6.5 è un esempio di dati in uscita da un calcolo: un letto catalitico viene suddiviso in elementi cilindrici di qualche millimetro di spessore ciascuno. I dati in ingresso comprendono pressione, temperatura, flusso gassoso e sua composizione, caratteristiche delle particelle di catalizzatore e geometria del letto catalitico.

Un programma numerico valuta tutti i parametri cinetici interessanti, sia sulla superficie del catalizzatore, che nella massa gassosa a contatto, partendo dalla sezione di ingresso del gas per terminare alla sezione di uscita. In particolare si possono qui notare, lungo la sezione del letto, i diagrammi relativi alle concentrazioni di Metanolo ed Ossigeno, la temperatura, la velocità di reazione sulla superficie catalitica e quella media misurabile nella massa del gas, il fattore di efficienza del catalizzatore, il grado di conversione del Metanolo.

Illustriamo infine il progetto di un reattore industriale a stadi adiabatici.

La Fig. 6.6 è il disegno di assieme di un reattore da 60.000 t/a di Formaldeide 37%. E' costituito da 5 stadi di reazione, in cui il volume di catalizzatore aumenta, di stadio in stadio, per tenere conto del progressivo decrescere della velocità di reazione.

Il mantello ha un diametro di 2.8 m, l'altezza della parte cilindrica è di 9.4 m.

Il fascio tubiero interno, facilmente estraibile dalla testa del reattore, è realizzato con tubi standard da 6 m di lunghezza.

Il peso totale dell'apparecchio è di circa 30 tonnellate.

E' interessante notare che un reattore tubolare da 40.000 t/a, con capacità massima pari ai 2/3 di quella del reattore adiabatico appena illustrato, avrebbe un diametro pari a 4.2 m ed un peso di circa 40 tonnellate.

E' quindi evidente il notevole risparmio di peso, e quindi di costo, del reattore adiabatico.

In conclusione, il nuovo reattore messo a punto da Casale per l'ossidazione del Metanolo a Formaldeide gode almeno dei seguenti vantaggi, in confronto ai reattori tubolari dell'arte nota:

- l'eliminazione di un fluido intermedio per la rimozione del calore di reazione. Ciò non solo elimina i rischi operativi e riduce i costi di manutenzione, ma permette l'eliminazione di tutto il macchinario dedicato alla circolazione, accumulo, raffreddamento, ecc. del fluido stesso;
- una riduzione dei tempi di messa in marcia;
- un miglior controllo della distribuzione delle temperature del catalizzatore, con l'effetto di prolungarne la vita utile e di operare con migliore selettività di reazione;
- una maggiore facilità di carico e scarico del catalizzatore;
- una sostanziale riduzione di dimensioni, di peso e quindi di costo del reattore, a parità di capacità produttiva;
- una rimozione dei limiti di capacità dovuti a motivi costruttivi: reattori di questo tipo possono essere facilmente progettati ed eseguiti per capacità produttive molto elevate.

La sperimentazione industriale del nuovo reattore è stata condotta mediante una unità da 12.000 t/a (Formaldeide al 37%). I risultati hanno soddisfatto le aspettative. La foto in Fig. 6.7 è stata eseguita durante una fase di montaggio di questo reattore.

Ad oggi sono stati progettati reattori di varia capacità, fino a 200.000 t/a di Formaldeide (37%). Varie trattative sono in corso, sia per la costruzione di nuovi impianti, sia per la sostituzione di convenzionali reattori tubolari.