

SIMULAZIONE DELL'EPLOSIONE DI ATRAZINA IN UN SILO DA 55 M³.

C. Majorana*, D. Marcolin***, M. Pellissero****, L. Rosa**

* Prof. Associato, Dipartimento di Costruzioni e Trasporti, Università degli Studi di Padova,

** Prof. Associato, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università degli Studi di Padova,

*** Laureato freq. Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università degli Studi di Padova,

**** Ricercatore SYRECO, Gavirate (VA)

1. SOMMARIO

Il presente lavoro ha per oggetto la simulazione della deflagrazione della polvere di Atrazina in un silo di acciaio. Dopo aver descritto le caratteristiche geometriche del silo e quelle dell'ignizione e della deflagrazione in due diversi possibili scenari, si procede con il relativo calcolo strutturale in ipotesi di comportamento elastoplastico del materiale, sotto l'effetto dinamico dell'onda di pressione derivante dall'esplosione. Si suppone che, nel secondo scenario, corrispondente a sollecitazione estrema del materiale, il limite delle deformazioni infinitesime sia rimosso, accettando un comportamento non lineare anche per geometria, in grandi deformazioni. La presentazione dell'evoluzione del comportamento meccanico del silo, mediante mappe delle componenti di spostamento, di tensione e di danneggiamento, completa il lavoro.

2. INTRODUZIONE

In questa memoria si descrive la simulazione della deflagrazione della polvere di Atrazina contenuta in un silo, come indicato in Figura 1. Il silo è installato all'aperto; la sua capacità è di 55m³ ed è inserito in un impianto produttivo di 1.000 Mg/y, secondo lo schema illustrato in Figura 2. La costruzione del silo è stata realizzata in carpenteria metallica; precisamente, il mantello e la piastra superiore (di 3 mm di spessore) nonché il fondo inferiore (di spessore 30 mm) in acciaio inox AISI 304 (X5CrNi1810), mentre la corona di sostegno e le travi di acciaio sono state realizzate con acciaio Fe 34.

L'esame della situazione di impiego reale del silo ha accertato che al suo interno sono presenti, insieme alla polvere di Atrazina, anche vapori di Toluolo derivanti dal processo produttivo di essiccazione, che aggravano i pericoli di deflagrazione ed imporrebbero probabilmente un trasporto della polvere in atmosfera inerte anche nei rami dell'impianto adiacenti al silo. Per ora sono stati esclusi dall'analisi i probabili effetti della contemporanea presenza delle due sostanze, semplicemente per la difficoltà di reperire dati attendibili a riguardo della loro mutua influenza sulla velocità di deflagrazione e sul livello di pressione raggiungibile. D'altra parte, il meccanismo di deflagrazione è stato volutamente preso al livello critico, cioè quello derivante da un'infiltrazione di aria nel silo, tale da creare la massima pressione di picco possibile.

Il silo è stato progettato nelle due situazioni alternative:

- di resistenza alla pressione massima di 0.2 bar, limitata dall'apertura delle aree di scoppio calcolate secondo la normativa NFPA 68 e VDI 3673, senza deformazione permanente della struttura;
- di resistenza alla pressione massima di 6.4 bar, determinata dalla deflagrazione della polvere di Atrazina alla concentrazione in aria tale da creare la massima pressione di picco. In questo caso, il silo non è dotato di aree di scoppio e la sua struttura deve essere in grado di resistere alla deformazione permanente, senza pervenire a rottura. Inoltre, è stato esaminato lo spostamento dei punti di collegamento del silo alle tubazioni di trasporto.

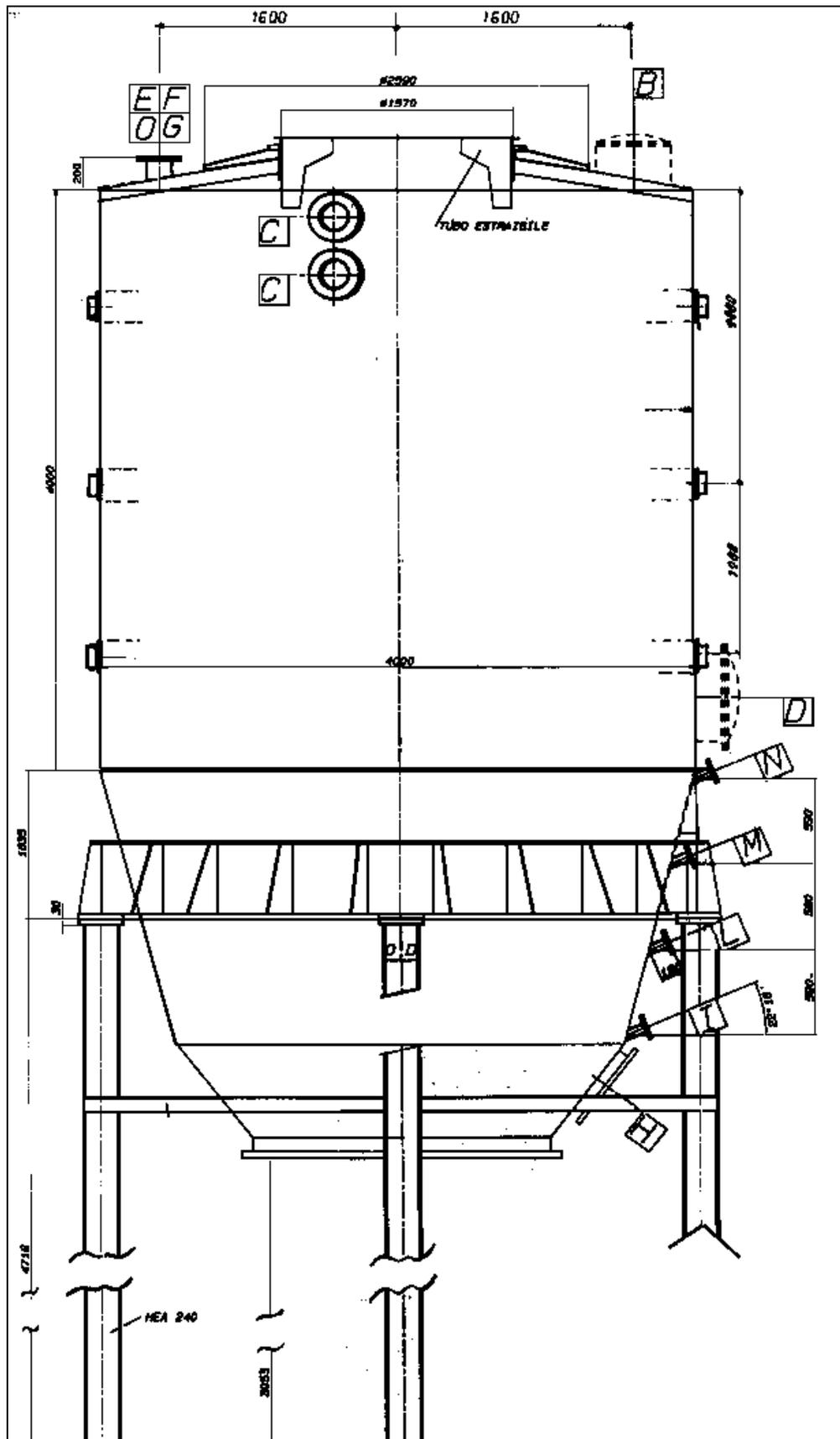


Figura 1. Struttura del silo

L'alternativa deriva dalla necessità di valutare il rapporto ottimale *costo del silo / rischio residuo*, con riferimento alle opere di protezione necessarie nell'ambiente di installazione, nel caso si dovesse verificare l'incidente. Infatti, nel primo caso, l'apertura delle aree di scoppio deve essere valutata per gli effetti che essa può provocare sulle strutture circostanti, sia per quanto riguarda la propagazione dell'incendio, che per quelli dell'onda di pressione. Invece, pur restando il silo inservibile dopo l'incidente, tali pericoli sono molto ridotti se si segue procede con la seconda alternativa, e soprattutto se si studia in modo approfondito il collegamento delle tubazioni di convogliamento del prodotto.

Dal punto di vista del costo operativo industriale, si deve valutare che, nel passaggio dalla prima alla seconda alternativa, la massa del silo passi da 6.5 a 17.5 Mg.

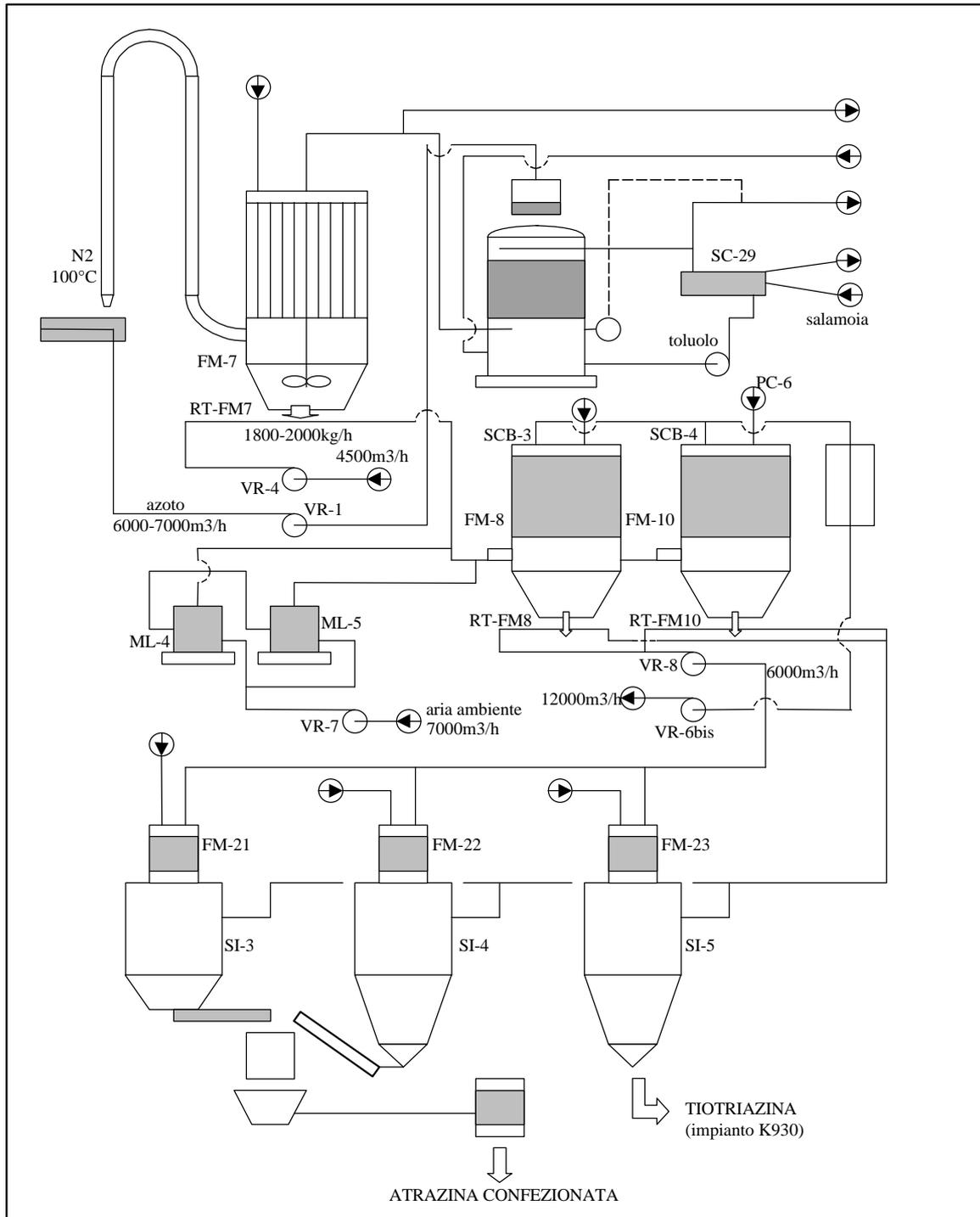


Figura 2. Schema dell'impianto per la produzione di Atrazina

3. DATI DEL PROBLEMA ANALIZZATO

Per la simulazione dell'esplosione dell'Atrazina, sono stati assunti i seguenti dati:

composizione chimica:	2cloro 4etilamino 6isopropil-s-triazina, C ₈ H ₁₄ ClN ₅ ;		
classe di pericolo della polvere:	St-1	temperatura di esplosione	530 °C
		concentrazione	90g/m ³
		energia di ignizione	28mJ
		pressione massima di picco	5 ÷ 6.4 bar
indice di deflagrazione	$k_{st} = \left. \frac{dp}{dt} \right _{max} = 120 \div 140 \text{ bar/s}$		
temperatura e pressione iniziali:	ambiente		
distribuzione della polvere:	omogenea e non omogenea		
tipologia del recipiente:	cubico ad asse verticale, $1 < L/D \leq 2$		
protezione:	aree di scoppio attivate staticamente a 0.1 bar (VDI 3673) disposizione orizzontale, assialsimmetrica sul fondo superiore, superficie complessiva: 4.0 m ² : 1 centrale da 1 m ² , 2 da 1.5 m ² picco di pressione ad 8 m di distanza: 0.1 bar forza massima sulle colonne di sostegno: 95.2 kN		

Le caratteristiche di esplosività assunte per l'Atrazina sono rappresentate in Figura 3.

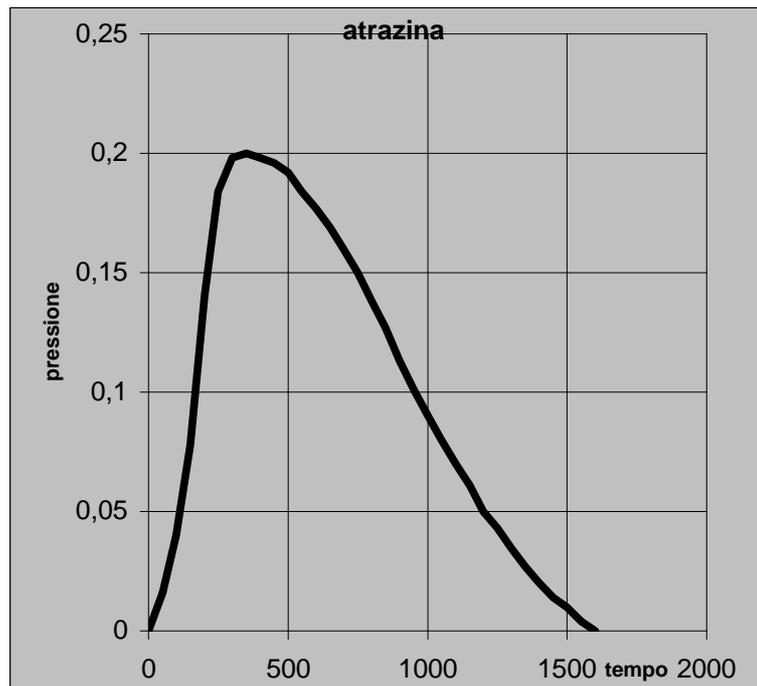


Figura 3. Caratteristiche di esplosività dell'Atrazina.

4. DESCRIZIONE DEL MODELLO

Come sopraindicato, sono state esaminate due situazioni: **a)** deflagrazione della polvere nel silo protetto da aree di scoppio aventi una superficie totale di 4.0 m², **b)** deflagrazione nel silo non protetto da aree di scoppio, con deformazione permanente del mantello, ma senza raggiungere il carico di rottura.

4.1. CASO DEL SILO PROTETTO DA AREE DI SCOPPIO

Per questa situazione si è verificata la pressione massima tollerabile dal silo secondo la norma VDI 2263/3, considerando una tensione di Von Mises massima tollerabile dal materiale (al carico limite di scostamento dalla proporzionalità $R_{p1.0}$, con coefficiente di sicurezza 1.5) pari a 165 MPa.

La distribuzione delle tensioni è stata calcolata mediante simulazione con il codice ANSYS 5.3 per le due situazioni di innesco della deflagrazione: i) ad una distanza di circa 4 m dal fondo inferiore, sull'asse del recipiente, ii) alla stessa quota, ma alla distanza di 1.4 m dall'asse.

Tra le varie ipotesi possibili, sull'andamento della curva di pressione prima che le aree di scoppio si aprano, si è assunto di adottare l'espressione di Faber, che fornisce il tempo di salita t_f della pressione fino al valore p_{red} , rappresentativa della pressione di picco nel silo, con apertura delle aree di scoppio aventi superficie pari ad A:

$$t_f = \frac{0.0001 \cdot k_{st} \cdot V}{p_{red} \cdot A} = 1.6 \text{ s} \quad (1)$$

Conseguentemente, l'andamento della rampa di salita della pressione si presenta come riportato in Figura 4.

Per quanto riguarda la propagazione dell'onda di deflagrazione, si è assunta la velocità di aumento della pressione secondo Lees, la quale è in buon accordo anche con l'indicazione di Field:

$$U = c_0 \cdot \left(1 + 6 \cdot \frac{p^0}{7 \cdot P} \right)^{0.5} = 390 \text{ m/s} \quad (2)$$

dove p^0 è la pressione massima ammessa, P è la pressione iniziale e c_0 è la velocità del suono in aria.

4.1.1. Innesco sull'asse del silo

Lo schema dell'innesco è rappresentato in Figura 4: il silo è stato suddiviso in 8 volumi e, per ciascuno di essi, è stata applicata la relazione (2). Si è poi fatta una media dei valori dei tempi impiegati dall'onda di deflagrazione per raggiungere i punti più vicino e più lontano dal punto di innesco.

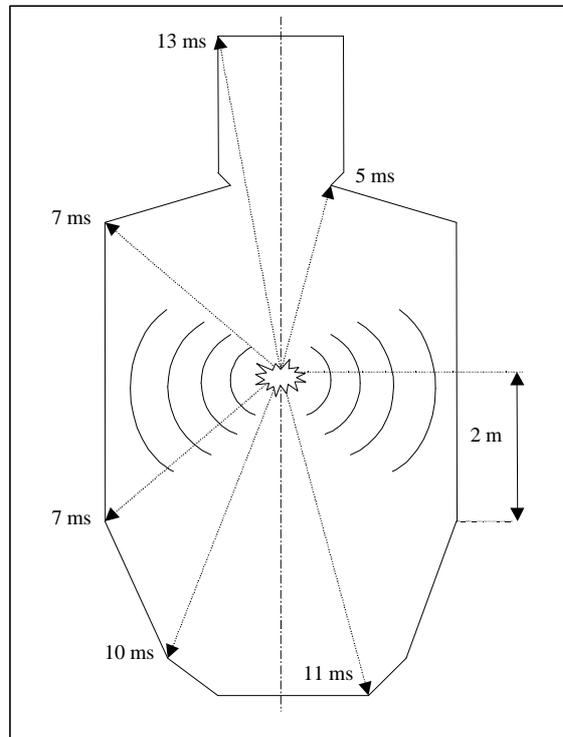


Figura 4: Ritardo applicato alla curva di pressione, durante l'esplosione, in corrispondenza a vari punti della struttura, in misura proporzionale alla loro distanza dal punto di ignizione (secondo le precedenti ipotesi).

Si è quindi ipotizzato che la propagazione avvenga secondo un'onda sferica e che non si verifichino riflessioni. I valori dei tempi suddetti sono riportati nella stessa Figura e, tenuto conto della simmetria del modello, si è ipotizzato che l'apertura delle aree di scoppio avvenga contemporaneamente alla pressione di 0.1 bar.

I risultati della simulazione dinamica pongono un valore della tensione massima di 157.3 MPa (pari ad un incremento del 14% del corrispondente valore ottenuto in condizioni statiche). Tale tensione è raggiunta sul bordo di raccordo tra il mantello ed la piastra superiore.

L'evoluzione delle tensioni equivalenti di Von Mises, per otto istanti temporali successivi, è rappresentata in Figura 5.

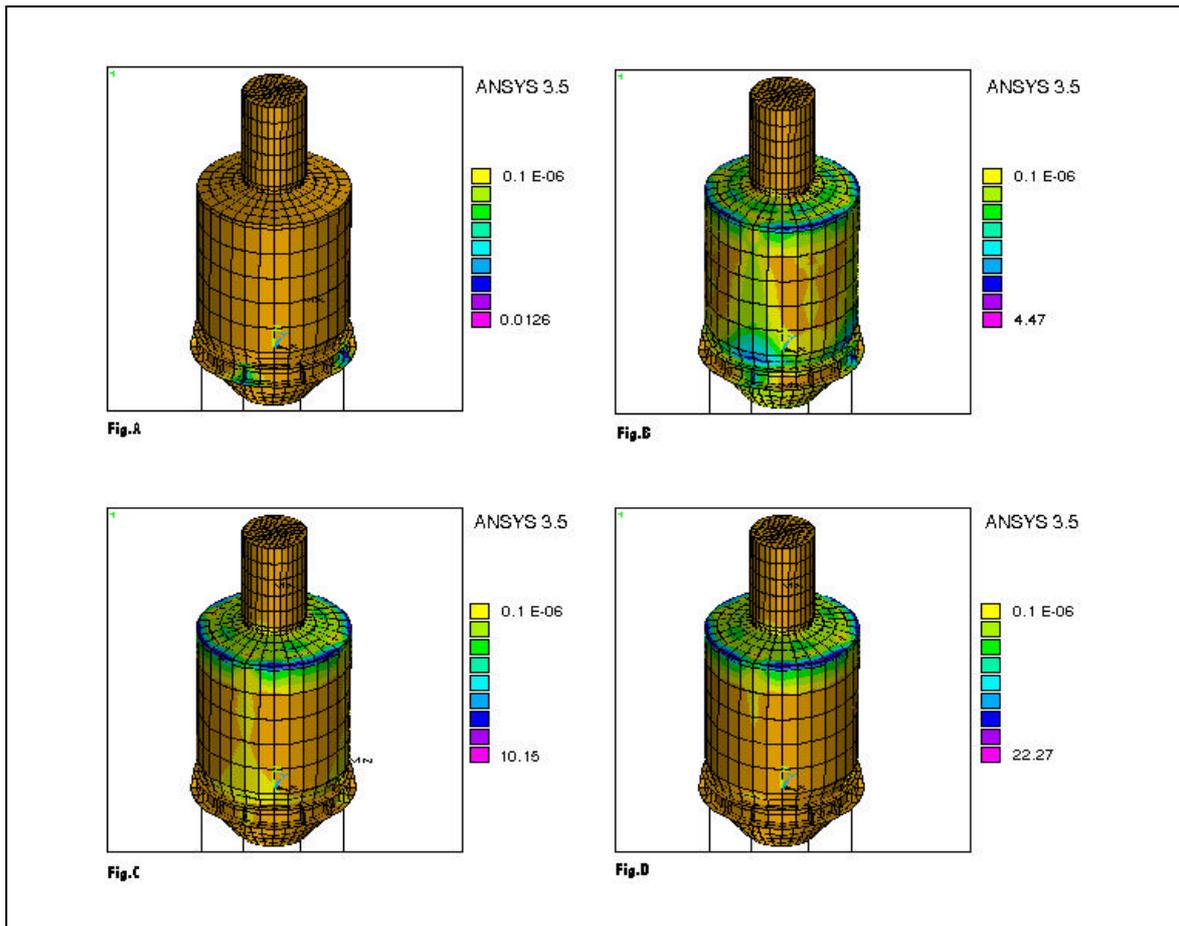


Figura 5. A) Tensioni equivalenti di Von Mises a 0.01 ms, $\sigma_{\max}=0.013$ MPa; B) a 30 ms, $\sigma_{\max}=4.47$ MPa; C) a 60 ms, $\sigma_{\max}=10.15$ MPa; D) a 100 ms, $\sigma_{\max}=22.27$ MPa

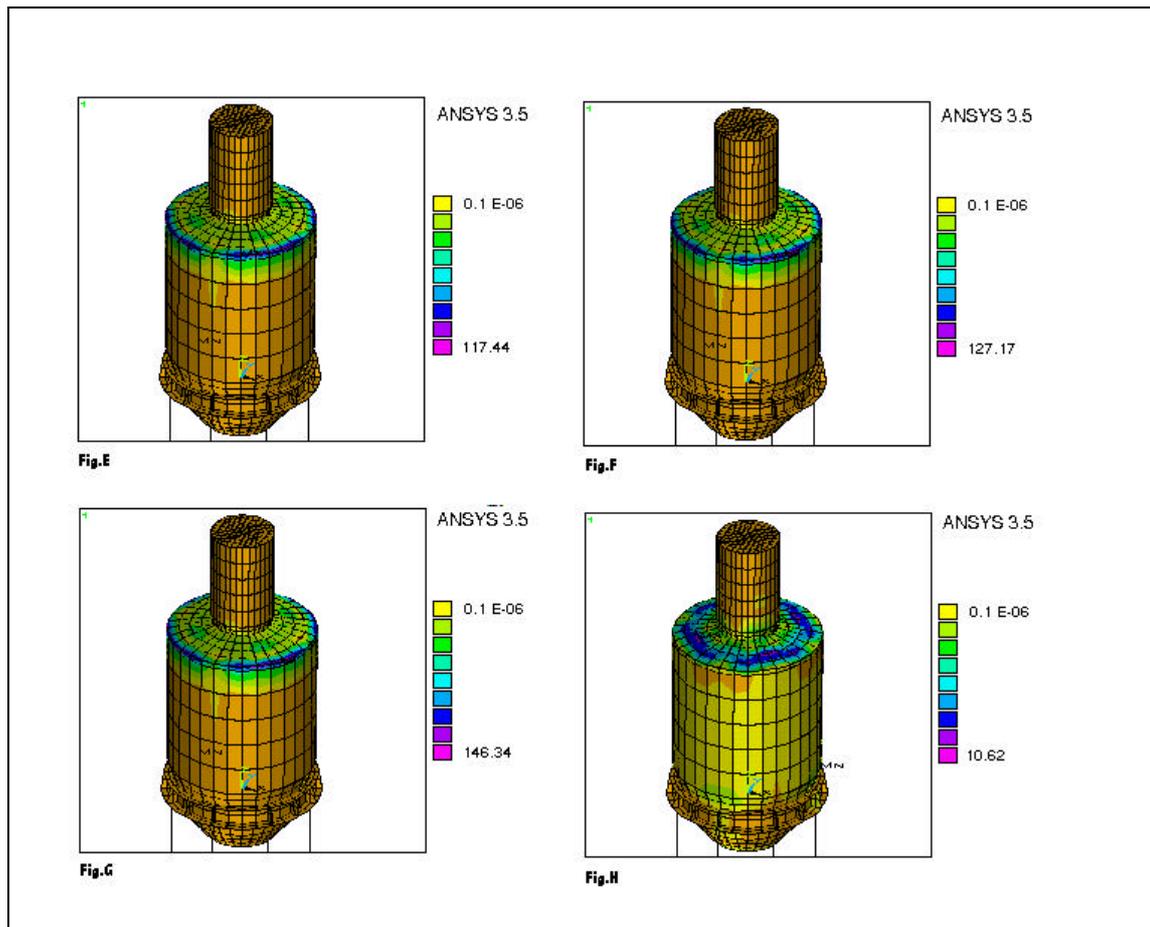


Figura 5. **E)** Tensioni equivalenti di Von Mises a 200 ms, $\sigma_{\max}=117.44$ MPa; **F)** a 260 ms, $\sigma_{\max}=127.17$ MPa; **G)** a 460 ms, $\sigma_{\max}=146.34$ MPa; **H)** a 1500 ms, $\sigma_{\max}=10.62$ MPa

4.1.2. Innescò ad 1.4 m dall'asse del silo

La Figura 6 mostra lo schema dell'innescò dell'esplosione disassato di 1.4 m, per lo studio della quale il silo è stato suddiviso in 14 volumi. In questo caso si è esaminata la dissimmetria con la quale l'onda raggiunge le pareti e, conseguentemente, la non contemporanea apertura delle aree di scoppio. Ne deriva una distribuzione non simmetrica delle forze di reazione esercitate dal getto di gas e polvere in uscita dalle aree di scoppio, che può creare un carico radiale sulla struttura tale da metterne in crisi la stabilità di posizionamento, altrimenti garantita dalle colonne di sostegno.

I risultati della simulazione hanno evidenziato una sostanziale conferma della sollecitazione massima, rispetto a quella ottenuta con innescò sull'asse. Inoltre, l'arrivo dell'onda di deflagrazione, dopo soli 30 ms, presso una delle aree di scoppio, crea incrementi di tensione limitati e comunque tali da non rappresentare un indice di pericolo per la stabilità del silo.

4.1.3. Verifica della pressione di apertura delle aree di scoppio

Tale verifica è necessaria per accertare l'entità della pressione introdotta nei calcoli relativi alla determinazione della superficie delle aree di scoppio, nel rispetto della Norma VDI 3673.

Scegliendo di utilizzare come materiale una lega di alluminio con resistenza massima a trazione di 215 MPa ed allungamento a rottura del 12%, lo spessore di progetto risulta di 4.5 mm e la massa di 19 kg.

L'applicazione progressiva della pressione del silo secondo lo schema precedente permette di calcolare che la completa apertura delle aree si ha a 160 ms dall'innesco, quando la pressione presenta ancora un valore estremamente basso, pari a 0.04 bar ed i portelli delle aree di scoppio sono aperti a 90°.

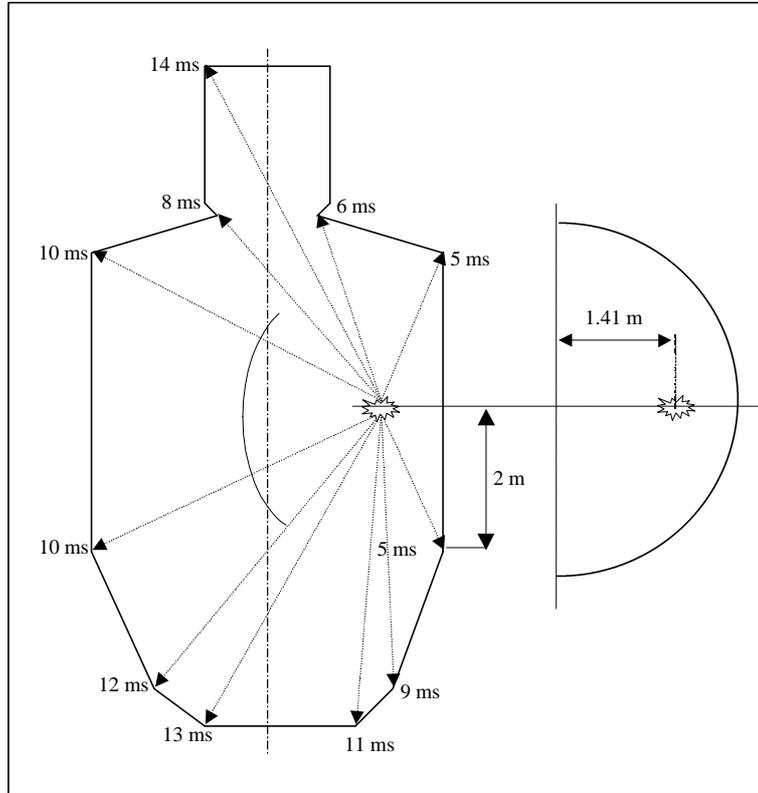


Figura 6: Ritardo applicato alla curva di pressione durante l'esplosione a vari punti della struttura, in misura proporzionale alla loro distanza dal punto di innesco (secondo le assunzioni fatte in precedenza).

4.2. CASO DEL SILO NON PROTETTO DA AREE DI SCOPPIO

Non è fra gli scopi di questo studio determinare le modalità di rottura del silo sotto il profilo strutturale, per effetto di un'eventuale esplosione e nel caso in cui non siano previste aree di scoppio atte a scaricare la sovrappressione corrispondentemente generata. Una siffatta simulazione richiede scelte modellistiche diverse da quelle fin qui effettuate. E' peraltro utile controllare l'evoluzione delle tensioni e delle deformazioni quando si rimuova il limite delle deformazioni infinitesime, normalmente adottato nelle elaborazioni meccaniche. A tal fine si utilizza un andamento temporale della pressione, con valor massimo pari a 6,4 bar, del tipo seguente:

$$\left| \frac{dp}{dt} \right|_{\text{TEST}} \cdot V_{\text{TEST}}^{1/3} = 57 \cdot 0.0023^{1/3} = \left| \frac{dp}{dt} \right|_{\text{SILO}} \cdot V_{\text{SILO}}^{1/3} \cong \left| \frac{dp}{dt} \right|_{\text{SILO}} = 1.87 \text{ bar}$$

La massima pressione si ottiene in corrispondenza al seguente istante di tempo:

$$\frac{P_{\text{max}}}{\frac{dp}{dt}} = \frac{6.4}{1.87} = 3500 \text{ ms}$$

L'andamento della pressione è riportato nella Figura 7.

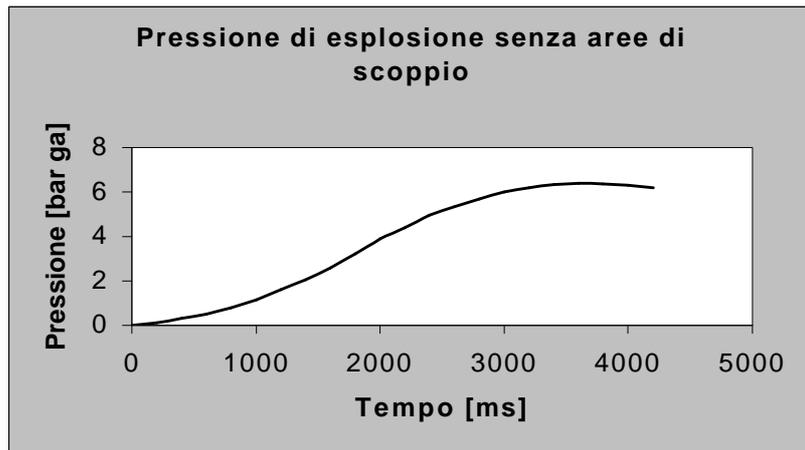


Figura 7: Andamento temporale della pressione nella simulazione del comportamento meccanico del silo non protetto da aree di scoppio.

In Figura 8 si riportano le mappe delle tensioni equivalenti di Von Mises sovrapposte alle configurazioni deformate del silo in ipotesi di grandi deformazioni.

L'analisi dei risultati ottenuti con le simulazioni numeriche effettuate permette di identificare la zona maggiormente sollecitata e deformata come quella di attacco del recipiente con la piastra superiore, zona in cui è prevista l'applicazione di un cordone di saldatura. Si osserva, peraltro, che i risultati sono relativi all'adozione di ipotesi non conservative per riguardo alla tipologia del materiale adottato, secondo le quali è stato assunto un acciaio con caratteristiche uniformi per tutto il recipiente.

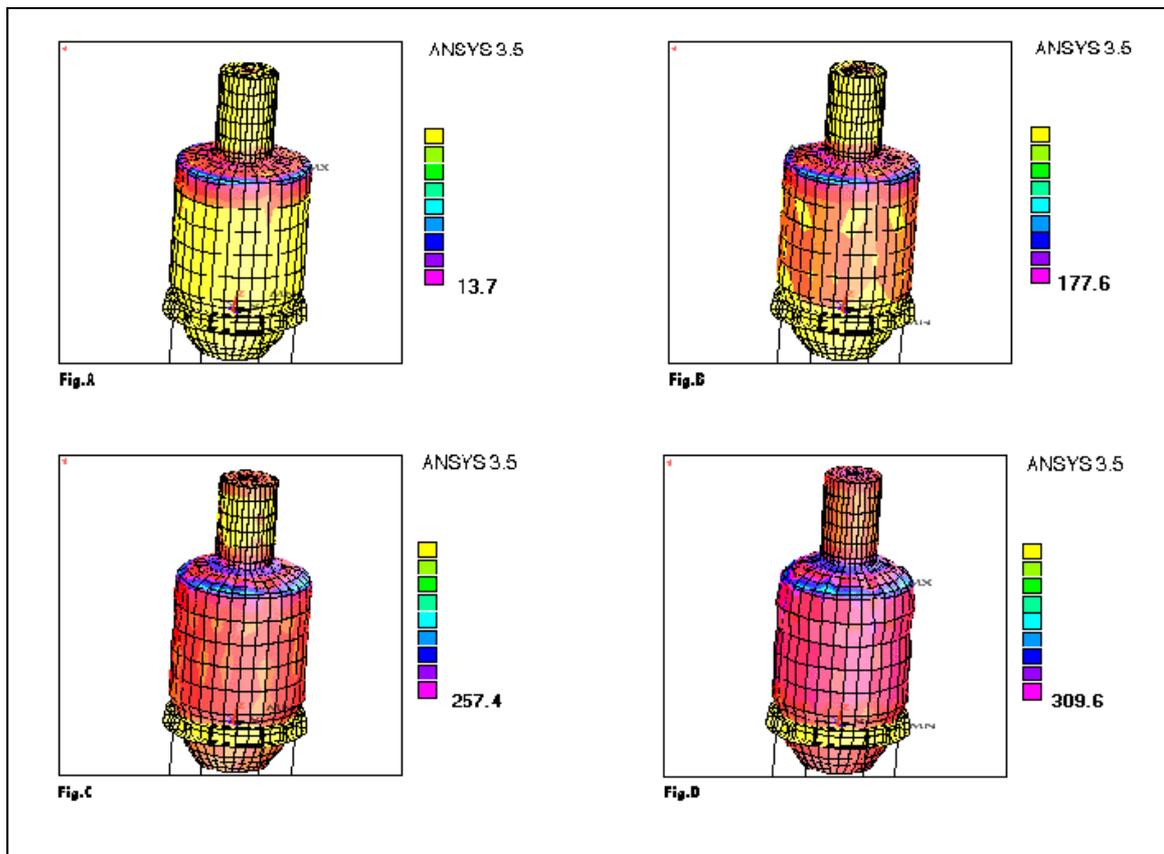


Figura 8. A) Tensioni equivalenti di Von Mises a 0.01 ms, $\sigma_{\max}=13.7$ MPa; B) a 30 ms, $\sigma_{\max}=177.6$ MPa; C) a 60 ms, $\sigma_{\max}=257.4$ MPa; D) a 100 ms, $\sigma_{\max}=309.6$ MPa

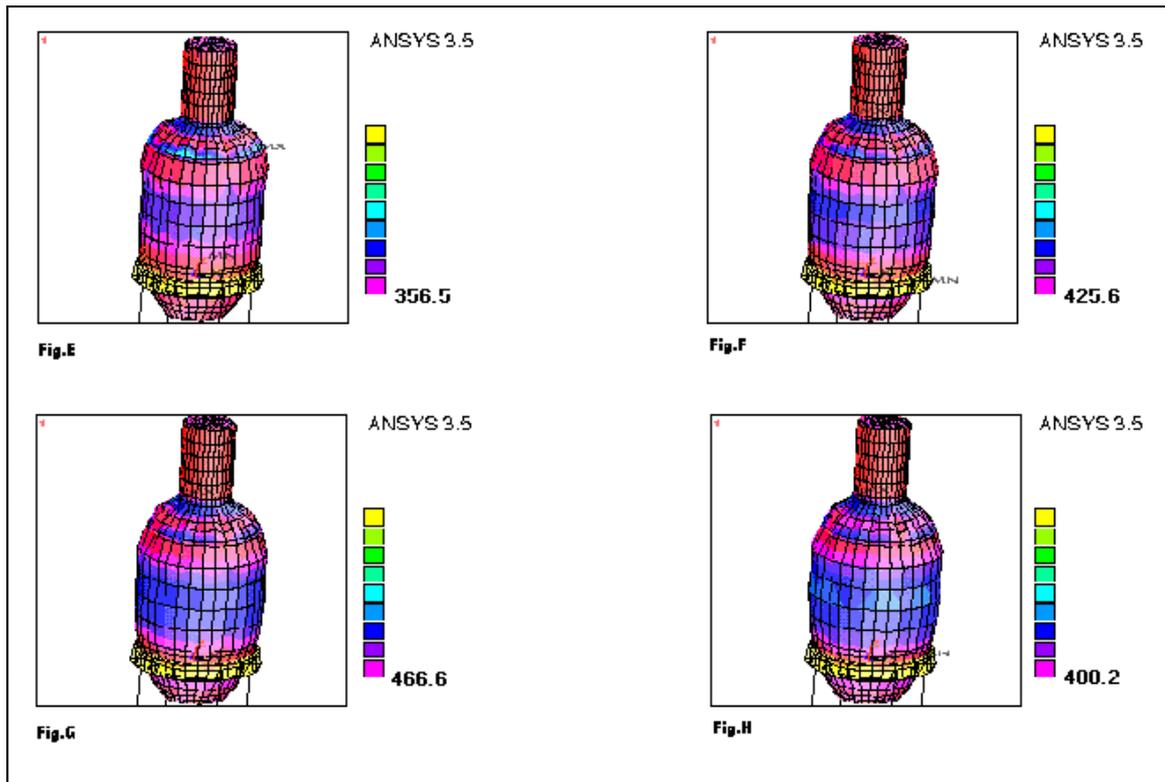


Figura 8. **E)** Tensioni equivalenti di Von Mises a 200 ms, $\sigma_{\max}=356.5$ MPa; **F)** a 260 ms, $\sigma_{\max}=425.6$ MPa; **G)** a 460 ms, $\sigma_{\max}=466.6$ MPa; **H)** a 1500 ms, $\sigma_{\max}=480.2$ MPa

5. CONCLUSIONI

E' stato esaminato il comportamento di un silo inserito nel processo di produzione nel caso di esplosione in aria dell'Atrazina in esso contenuta. Sono state considerate due configurazioni: i) silo dotato di portelli di scoppio, ii) silo senza portelli di scoppio ed in grado di resistere all'esplosione mediante grandi deformazioni plastiche.

Con la prima configurazione, si è esaminato l'andamento delle pressioni, sia nel caso in cui l'innesco all'esplosione avvenga sull'asse del silo, sia che esso si verifichi ad una distanza dall'asse pari al 35% del diametro. Si è verificato che i calcoli eseguiti seguendo la normativa VDI 3673 e quella NFPA 68/94 consentono di restare al di sotto dei limiti imposti dalle deformazioni infinitesime.

Per quanto riguarda la seconda configurazione, si è osservato che, per poter resistere all'esplosione, in assenza di portelli di scoppio è necessario aumentare lo spessore del mantello del silo ad un livello tale da portarne la massa da 6.5 a 17.5 Mg. In queste condizioni, tuttavia, si cade nel campo delle grandi deformazioni e, pur resistendo all'esplosione del prodotto in esso contenuto, il silo rimane irrimediabilmente danneggiato, ancorché ancora a tenuta. Perciò, il progettista dovrà eseguire la valutazione del rapporto *costo/beneficio* che tenga conto del vantaggio derivante dalla riduzione delle misure di sicurezza conseguente al ridotto impatto dell'esplosione sulle strutture circostanti, in relazione al maggior costo di costruzione del silo.

6. SIMBOLI

A	superficie dei portelli di scoppio	[m ²],
c ₀	velocità del suono in aria	[m/s],
D	diametro del silo	[m],

$k_{st} = \left. \frac{dp}{dt} \right _{\max}$	indice di deflagrazione	[bar/s],
L	lunghezza assiale del silo	[m],
P	pressione al momento dell'innesco dell'esplosione	[bar],
P_{red}, P_{max}	pressione di picco nel silo	[bar],
p^0	pressione massima ammessa nel silo	[bar],
St-x	classe di pericolo della polvere,	
$U = c_0 \cdot \left(1 + 6 \cdot \frac{p^0}{7 \cdot P} \right)^{0.5}$	gradiente della pressione secondo Lees	[bar/s],
V	volume del silo	[m ³],
σ_{max}	tensione massima nel materiale	[MPa].

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] F.P. Lees, Loss Prevention in the Process Industries, Butterworths & Heinemann, 1986,
- [2] VDI Richtlinien 3673, Pressure Venting of Dust Explosions, VDI, Dusseldorf, 1992
- [3] VDI Richtlinien 3673/1, Test Methods for the Determination of the Safety Characteristics of Dusts, VDI, Dusseldorf, 1990
- [4] VDI Richtlinien 3673/3, Pressure Shock Resistant Vessels and Apparatus Calculation, Construction and Tests, VDI, Dusseldorf, 1990
- [5] Draft Revision to NFPA 68/94, National Fire Protection Association, Boston, Ma, 1998
- [6] K.N. Palmer, Dust Explosions and Fires, Chapman & Hall, London, 1973