# ASTE DI PERFORAZIONE FRIZIONATE AD ALTA RESISTENZA MECCANICA E BASSA RESISTENZA Un'applicazione IDRAULICA INTERNA nella costruzione di aste per directional drilling:

Renzo Chirulli \*

#### Introduzione

Il directional drilling o perforazione teleguidata rappresenta una delle tecniche no-dig (senza scavo) più efficaci per la posa di cavi telefonici, elettrici, condotte del gas, acqua, ecc. in alternativa alle tradizionali tecniche di posa che prevedono invece lo scavo. L'impiego delle tecniche no-dig nelle opere di posa cavi e condotte, consente una notevole riduzione del costo generalizzato di tali opere attraverso l'eliminazione di certe voci del costo di costruzione (demolizioni, scavi e ripristini) e attraverso la riduzione dei costi di congestione od interruzione di traffico che sono quasi sempre associati alle interferenze che si creano tra cantiere ed infrastrutture di trasporto quando si opera con tecniche tradizionali. Un ulteriore fattore positivo è rappresentato dalla maggiore produttività, in termini di metri/giorno, che quasi sempre si associa alla tecnica no-dig nel confronto con le tecniche di posa con scavo. Gli indubbi vantaggi del directional drilling hanno spinto diversi costruttori di macchine per la perforazione e diverse imprese esecutrici a specializzarsi nella produzione

FWA Consultants - Bari . Consulente della "Colli Drill Srl" - Capena (RM) e membro della Italian Association for Trenchless Technology (IATT).

e quindi nell'uso di macchinari adatti a tale impiego.

Colli Drill Pipe DDR Lihr

Come per altre tecniche di perforazione anche nel directional drilling le aste di perforazione rappresentano uno dei componenti più importanti degli impianti [2]. La loro importanza deriva dal fatto che determinate prestazioni delle perforatrici in termini di raggi minimi di curvatura conseguibili in perforazione e massime lunghezze di tiro (pull-back) ottenibili, dipendono essenzialmente, a parità di prestazioni della macchina, dalle aste di perforazione che vengono impiegate.

Aste di insufficienti caratteristiche meccaniche non consentono prestazioni soddisfacenti pur avendo a disposizione le migliori macchine. Oltre a migliorare le prestazioni degli impianti di perforazione per quegli aspetti prettamente legati alle caratteristiche di resistenza meccanica, un'asta di perforazione può concorrere alla riduzione dei costi operativi di perforazione, attraverso l'abbattimento delle resistenze idrauliche interne che i fluidi di circolazione incontrano attraversando la batteria di aste. Secondo questo orientamento è nata una nuova tipologia di aste di perforazione ad alta resistenza meccanica e bassa resistenza idraulica interna, ideate e prodotte da un'azienda italiana: la Colli Drill S.r.l. di Capena (Roma).

Questo prodotto può essere impiegato non solo nel directional drilling, ma anche in altri settori della perforazione (ricerca d'acqua, jet grouting, fondazioni speciali, ecc.) diventando tanto più interessante quanto maggiori sono le pressioni e le portate dei fluidi impiegati nonché le profondità di perforazione. Nella presente memoria viene esposta un'analisi qualitativa dell'applicazione di aste a bassa resistenza idraulica interna, partendo dai risultati di una sperimentazione condotta su due prodotti commerciali dotati di differenti caratteristiche e costruiti dalla stessa azienda: la Colli Drill S.r.l.

E importante notare che sebbene nel testo di parli di aste per directional drilling, i risultati esposti possono essere estesi anche ad impieghi delle aste di perforazione a bassa resistenza idraulica interna differenti dal directional drilling.

## Le caratteristiche meccaniche di un'asta di perforazione per directional drilling

Nel directional drilling le principali caratteristiche richieste ad un'asta di perforazione sono l'alta elasticità e l'alta resistenza meccanica.

È noto che una batteria di aste di perforazione impiegata per directional drilling è soggetta ad una serie di forze esterne e deformazioni imposte che pongono ogni singola asta in uno stato di sollecitazione veramente estremo. Le forze esterne sono quelle trasmesse alla batteria dalla perforatrice e da eventuali utensili battenti fondo foro. Ogni singola asta risulta in generale sollecitata da un intenso complesso di forze nel quale sono quasi sempre presenti: trazione o compressione, flessione, torsione, sforzi impulsivi di compressione-trazione (dovuti alla eventuale azione di utensili battenti fondo foro<sup>1</sup>).

Gli sforzi flessionali possono derivare dal fatto che i fori pilota hanno quasi sempre andamento curvilineo (quanto meno nelle zone di ingresso ed uscita del foro).

La batteria è quindi costretta a ruotare contenuta in un foro ad andamento curvilineo, e cioè sotto l'azione di una deformazione imposta esterna, che è l'equivalente di una sollecitazione applicata.

L'acciaio ideale per la fabbricazione di aste per directional drilling dovrebbe quindi avere senza dubbio un alto limite di elasticità in termini di carico di scostamento dalla proporzionalità Rp0.2%, in modo da consentire grandi deformazioni in esercizio (senza deformazioni permanenti a fine esercizio) sotto l'azione di intense forze.

Ad esempio per una batteria composta da aste di 60.3 mm di diametro esterno e 47.4 mm di diametro interno, sollecitata da una perforatrice dotata di 5000 Nm di coppia e 130 KN di tiro, nell'esecuzione di una curva con 20.0 m di raggio la sezione più sollecitata presenta una tensione massima ideale pari a 535 N/mm². Questa tensione massima scende a 458 N/mm² se il raggio di curvatura sale a 30 m. Se applicassimo un martello battente fondo foro, le tensioni massime salirebbero enormemente.

Il semplice esempio appena illustrato evidenzia come per la fabbricazione di aste di perforazione per directional drilling occorrano acciai dotati di caratteristiche meccaniche davvero eccellenti. Per la fabbricazione delle Colli Drill Pipe DDR Lihr, viene impiegato un acciaio ad alta resistenza: il 42CrMo4, dotato di caratteristiche meccaniche minime, come prescrive la nor-

mativa europea EN 10083 parte I, quali: Re = 900 N/mm² (che è pari al limite di snervamento, quando individuabile, o al carico di scostamento dalla proporzionalità Rp0.2%) ed Rm=1100 N/mm² (carico unitario di rottura).

Si tratta di valori molto elevati anche in considerazione della buona resistenza agli urti che presenta questo acciaio (KV=30 J). Le Colli Drill Pipe DDR Lihr sono aste saldate ad attrito.

Per la saldatura di acciai così particolari è stato messo a punto un processo di saldatura ad attrito con successivo trattamento termico post saldatura che garantisce la realizzazione di giunti con resistenza e resilienza pari se non addirittura superiori a quella del metallo base [3].

I principali vantaggi offerti dalle aste di perforazione costruite assemblando mediante saldatura ad attrito manicotti filettati (tool joints) a tubi, sono i seguenti:

- i tool joints sono interamente lavorati su torni a controllo numerico; in questo modo oltre ad ottenere naturalmente ottime finiture delle filet-
- tature e delle superfici esterne, è possibile soprattutto ottenere superfici dei convergenti, dei divergenti e dei minimi passaggi interni aventi forma e rugosità rigorosamente controllate, e questo aspetto è molto importante perché contribuisce in maniera consistente alla riduzione delle resistenze idrauliche che si manifestano all'interno dell'asta, portando, come vedremo, ad una sensibile riduzione dei costi di perforazione;
- i tool joints possono essere sottoposti ad opportuni trattamenti termochimici che garantiscono alta resistenza all'usura delle filettature, prevenendo il verificarsi di fenomeni di grippaggio, e facilitando le operazioni di montaggio e smontaggio delle batterie di aste.

Questo non è possibile per esempio per le aste forgiate one-piece, in quanto, specie nei tratti convergenti e divergenti (che tra l'altro restano indifferenziati), non si riesce ad operare una opportuna lavorazione al tornio delle superfici interne ottenendo a fine lavorazione tronchi di passaggio (i convergenti e divergenti) aventi forma e stato delle superfici interne poco controllate.

# Resistenze idrauliche nelle aste di perforazione

Sotto l'aspetto idraulico una batteria di aste di perforazione è sostanzialmente un condotto lungo in quale si verificano, durante il moto del fluido di circolazione (aria, acqua o fanghi), una serie di trasformazioni di energia. Non tutta l'energia originaria posseduta dal fluido (energia cinetica e di pressione) si ritrova alla fine della batteria di aste sotto forma di energia utile. Una parte si è trasformata lungo il tragitto in forme di energia che non sono utilizzabili per l'applicazione corrente. Generalmente l'energia non utilizzabile è quella che ritroviamo o sotto forma di calore o sotto forma di energia cinetica di agitazione del fluido nelle zone di moto vorticoso presenti in certi punti del condotto.

Queste trasformazioni di energia che per noi rappresentano perdite di energia utile sono dovute in generale a tre cause fondamentali:

- il fluido è reale, ovvero è dotato di un certo attrito interno o viscosità;
- le pareti del condotto oppongono una certa resistenza al moto del fluido per via dell'attrito esistente tra parete e fluido;
- lungo la batteria di aste, ed in particolare in corrispondenza delle connessioni tra asta ed asta, si hanno brusche variazioni di sezione in cor rispondenza delle quali si localizzano fenomeni di moto vorticoso del fluido. Concentrando la nostra attenzione al terzo degli aspetti appena richiamati, possiamo facilmente osservare come in una connessione tra asta ed asta (fig. 1), del tipo full O.D., si abbia dapprima un restringimento di sezione (convergente) seguito da un breve condotto a sezione costante (minimo passaggio interno) e quindi da un al largamento di sezione (divergente).

Nel tratto di connessione asta-asta si manifesteranno moti vorticosi del fluido la cui intensità varierà, a parità di 
altre condizioni, in funzione della geometria dei vari tronchi che compongono la connessione nel suo insieme.
Per quanto riguarda il minimo passaggio interno vanno invece ricordati due 
aspetti rilevanti:

 che la resistenza idraulica lungo tale condotto sarà tanto maggiore quanto più piccolo è il diametro;

Come nel directional drilling a secco in roccia con martello battente fondo foro.



 che i fenomeni turbolenti nei tratti convergente e divergente saranno tanto più intensi quanto più piccolo è il rapporto tra la sezione trasversale del minimo passaggio interno e la sezione trasversale del tubo.

Come già ricordato l'energia che si trasforma in forme non utili, rappresenta per noi energia persa. Quanto maggiore sarà questa energia persa tanto minore sarà la portata e/o la pressione di fluido disponibile al fondo foro.

Questo si può tradurre in una minore produttività nella perforazione (metri/giorno) ed in un maggiore consumo di energia degli impianti di alimentazione del fluido (pompe, compressori), e quindi più in generale in un aumento del costo generale di produzione per metro di perforazione.

Esiste quindi una componente del costo di produzione che è funzione delle caratteristiche idrauliche delle aste di perforazione impiegate.

Volendo ottenere una riduzione di questa componente di costo occorre quindi agire sulle cause che danno origine alle resistenze idrauliche richiamate in precedenza.

L'attrito tra parete interna del condotto e fluido in moto dipende, a parità di altre condizioni, dalla scabrezza di tali pareti. Un accurato stato di finitura delle pareti dei condotti può produrre una sensibile diminuzione delle resistenze idrauliche. Un altro aspetto sul quale è senz'altro possibile intervenire, per diminuire sensibilmente le resistenze idrauliche, è la forma dei condotti interni in corrispondenza delle connessioni tra asta ed asta.

Un opportuno disegno di tali tronchi, ed in particolare di convergenti, divergenti e minimi passaggi interni, può addirittura eliminare le zone in cui si manifestano normalmente intensi moti vorticosi del fluido, con riduzione rilevante delle perdite di energia [1].

#### Aste frizionate a bassa resistenza idraulica interna

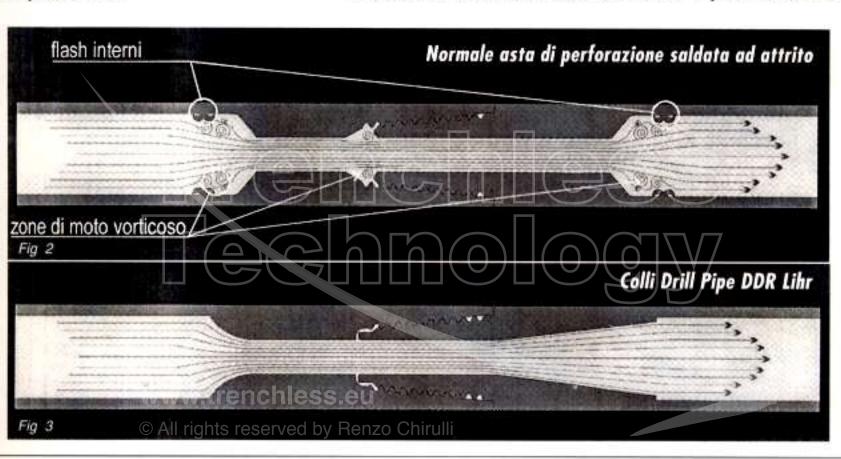
Le aste di perforazione Lihr sono state concepite con l'obiettivo di ridurre sensibilmente le perdite di energia che si manifestano in corrispondenza delle connessioni tra asta ed asta.

Se esaminiamo la sezione longitudinale di una connessione tra normali aste di perforazione saldate ad attrito (fig. 2), si osserva subito la presenza dei caratteristici cordoni di bava (flash) che si originano durante il processo di saldatura.

Questi cordoni danno origine proprio in una

zona delicata per il flusso del fluido (i convergenti ed i divergenti) a resistenze idrauliche ulteriori dovute essenzialmente al generarsi di moti vorticosi del fluido nel quale viene persa una certa percentuale di energia utile. Nella realizzazione della serie LIHR, un primo problema era quindi quello di realizzare un giunto, saldato ad attrito, che non presentasse il tipico cordone di bava interno. Questo è stato ottenuto grazie allo sviluppo di una particolare tecnica di saldatura ad attrito ad inglobamento di flash interno applicata alla fabbricazione delle aste di perforazione2. Dopo molti studi e soprattutto dopo molta sperimentazione il risultato ottenuto è stato sorprendente. I flash interni risultano perfettamente integrati nei corpi dei tool joints e la resistenza meccanica dei giunti è caratterizzata da carichi unitari di rottura e resilienze pari a quelle del metallo base. Eliminato il flash interno è stato quindi possibile conformare i condotti interni in maniera da ottimizzarne il funzionamento da un punto di vista idraulico. Per la risoluzione di questo secondo problema sono stati studiati profili idraulici differenziati per i tratti

> convergenti e per quelli divergenti [1]. Questo impone che le aste LIHR possano essere impiegate efficacemente solo in un verso. La speciale forma dei condotti nei tratti convergenti e divergenti, garantisce una rilevante diminuzione delle zone di moto vorticoso (fig. 3).



brevetto internazionale con copertura su tutti i paesi che aderiscono al PCT, di proprietà della Colli Drill S.r.l. e del FWA Consultants Ing. Renzo Chirulli.



Fig 4

Per misurare sperimentalmente l'effetto di tali accorgimenti sono stati condotti alcuni semplici tests facilmente riproducibili.

Per questi esperimenti sono state utilizzate aste normali saldate ad attrito del tipo X-series ed aste del tipo Lihr entrambe prodotte dalla Colli Drill S.r.l. Le aste impiegate, del tipo full O.D., avevano lunghezza pari a 3 m, un diametro esterno di 60.3 mm, diametro interno del tubo pari a 47.4 mm e diametro interno del minimo passaggio interno pari a 20 mm.

Ciascuna batteria era composta da 20 aste, per un totale di 60 m di lunghezza.

Le due batterie, perfettamente affiancate in modo da avere andamenti planoaltimetrici identici, sono state alimentate nel primo esperimento con aria e nel secondo con acqua.

Sono state condotte essenzialmente misure delle velocità di efflusso di aria e acqua uscenti nell'atmosfera dalle due differenti batterie di aste nelle medesime condizioni di geometria di

efflusso e di alimentazione (n. di giri del motore del compressore, pressione iniziale dell'aria, pressione iniziale dell'acqua).

Utilizzando aste del tipo Lihr, con l'aria è stato registrato un incremento di velocità di efflusso e quindi di portata pari a:

$$\Delta \mathbf{v}_{c} \% = \Delta \mathbf{Q} \% = +10.0\%$$

e un incremento di energia cinetica utile del fluido pari a:

$$\Delta E_c \% = + 21.0\%$$

Con l'acqua invece gli incrementi registrati, usando aste del tipo Lihr, sono stati:

· velocità di efflusso e portata:

$$\Delta \mathbf{v}_{c} \% = \Delta \mathbf{Q} \% = + 10.5\%$$

energia cinetica utile del fluido:

$$\Delta E_c = + 22.0\%$$

Per la misura delle velocità di efflusso dell'aria è stato utilizzato un semplice dispositivo (fig. 4) costituito da una ventola solidale con l'alberino di un motore elettrico che girando, sotto l'azione del flusso d'aria, forniva una uscita in tensione proporzionale al numero di giri del motore elettrico.

La geometria ugello-ventola naturalmente era fissa per entrambe le condizioni di prova (aste Lihr ed aste Xseries). Per la prova con acqua è stato invece utilizzato un metodo ancora più elementare. È stata infatti misurata la gittata del getto d'acqua uscente dal medesimo ugello sistemato prima su una batteria e quindi sull'altra (fig. 5); per il calcolo della velocità di uscita è stata impiegata una formula cinematica la cui validità di applicazione è limitata al verificarsi delle seguenti condizioni:

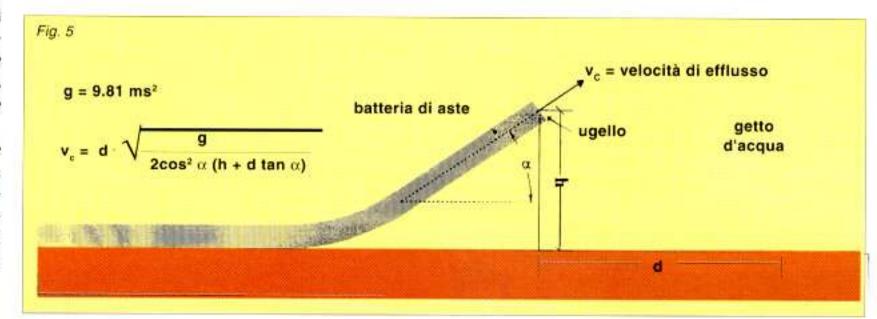
- bassa velocità di efflusso
- · bassa pressione di alimentazione
- getto d'acqua compatto
- · piccole gittate.

In queste condizioni l'incertezza della misurazione (gittata) è stata di ±1 cm.

I risultati appena illustrati sono stati ottenuti, come già anticipato, su due batterie di aste lunghe appena 60 m.

Con semplici considerazioni energetiche proviamo ora ad estrapolare, per lunghezze generiche della batteria di aste, i risultati appena ottenuti.

Consideriamo due batterie di aste di eguale lunghezza:  $L_T = n \cdot s_A$  (dove n è il numero di aste ed s, la lunghezza della singola asta) disposte perfettamente affiancate ed orizzontali. Se indichiamo con H l'energia iniziale del fluido che immettiamo in ciascuna delle batterie di aste, al momento dell'efflusso in atmosfera parte dell'energia si sarà trasformata in energia cinetica del fluido (che esprimiamo, a meno del peso specifico del fluido, come:  $E_c = v_c^2/2g$ ) e parte sarà stata spesa per superare le resistenze al moto all'interno delle batterie di aste. Indichiamo con E, tale energia persa.



E<sub>i</sub> (espressa sempre a meno del peso specifico del fluido) sarà pari alla somma di due addendi:

- l'energia persa per le resistenze incontrate durante il moto del fluido con continuità per l'attrito con le pareti del tubo: H<sub>p</sub>=L<sub>p</sub>·E<sub>p</sub> ; questa energia può essere espressa, una volta fissata la geometria e la scabrezza delle pareti del condotto e per il principio di conservazione della massa, in funzione della velocità di efflusso:  $H_p = L_p k v_c^2$  (con k costante, ed  $L_p$ pari alla lunghezza complessiva dei tratti di tubo, escluse le connessioni);
- l'energia persa per le resistenze localizzate che si manifestano in corrispondenza di ciascuna delle n connessioni asta-asta; questa perdita di carico può essere espressa, una volta fissata la geometria dei condotti e per il principio di conservazione della massa, in funzione della velocità di efflusso:  $H_c = \mathbf{n} \cdot \mathbf{k}_s \mathbf{v}_s^2$ .

In generale è possibile scrivere:

$$\mathbf{H} = \mathbf{E}_c + \mathbf{H}_P + \mathbf{H}_C \tag{1}$$

Come già visto i termini che compaiono a secondo membro della equazione [I], a parità di condizioni geometriche e di scabrezza dei condotti ed a parità di carico iniziale H, possono esprimersi tutti in funzione della velocità di efflusso v e del numero di aste n che compongono la batteria:

$$H = v_c^2 \left( \frac{1}{2g} + L_p k + n \cdot k_c \right)$$
 [II]

Se scriviamo l'equazione [II] per entrambe le batterie provate, avremo:

$$\begin{cases} H = v_{c1}^{2} (\xi + n \cdot k_{c1}) \\ H = v_{c2}^{2} (\xi + n \cdot k_{c2}) \end{cases} \text{ [III] } Con \xi = \frac{1}{2g} + L_{p}k$$

e rapportando membro a membro le equazioni del sistema [III] si ottiene che il rapporto tra i quadrati delle velocità di efflusso nelle due batterie di aste è esprimibile nella forma:

$$\sigma(n) = \frac{v_{c2}^2}{v_{c1}^2} = \frac{\xi + k_{c1}n}{\xi + k_{c2}n}$$
 [IV]

con ka e ka coefficienti di tipo fisico-geometrico che compaiono nelle espressioni delle resistenze idrauliche dei tratti di connessione tra asta ed asta.

Dalla [IV] si ricava anche, con semplici passaggi:

$$\Delta E_c = \frac{k_{c2} - k_{c1}}{\xi + k_{c1} n} \cdot n$$
 [V]

che esprime in che modo varia il guadagno di energia cinetica al variare del numero di aste n.

Applicando le relazioni [IV] e [V] al caso esaminato, se con  $\mathbf{v}_{ct}$  e  $\mathbf{k}_{ct}$  indichiamo rispettivamente velocità di efflusso e coefficiente di resistenza idraulica della singola connessione per la batteria di aste LIHR e con  $\mathbf{v}_{c2}$  e  $\mathbf{k}_{c2}$  le analoghe grandezze per la batteria di aste X-series, non è difficile dimostrare che, a parità di carico iniziale H ed a parità di andamento plano altimetrico delle due batterie, al crescere del numero di aste n che compongono le due batterie, il rapporto tra i quadrati delle velocità di efflusso tende ad un valore limite pari al rapporto tra i coefficienti fisico-geometrico che compaiono nelle espressioni delle resistenze idrauliche dei tratti di connessione tra asta ed asta; ovvero che:

$$\frac{\mathbf{v_{c2}}^2}{\mathbf{v_{c1}}^2} = \frac{\mathbf{k_{c1}}}{\mathbf{k_{c2}}}$$
 per n molto grande [VI]

In termini pratici ciò significa che riducendo la resistenza idraulica dei tronchi di connessione asta-asta, si raccoglie a parità di carico iniziale e di altre condizioni, una maggiore energia utile. Il minimo incremento di energia utile che possiamo avere è pari (in forma percentuale) a:

$$\Delta E_{c \min} \% = \frac{k_{c2} - k_{c1}}{k_{c1}} \cdot 100\%$$
 [VII]

### Conclusioni

Grazie all'uso di acciai speciali, grazie ad una tecnica di saldatura innovativa, grazie ad una attenta progettazione e sperimentazione del prodotto, è stato possibile realizzare un'asta per directional drilling che unisce prestazioni meccaniche eccellenti alla nuova possibilità di riduzione dei tempi e dei costi di perforazione che le basse resistenze idrauliche interne di quest'asta permettono.

Semplici tests facilmente riproducibili ed un'analisi qualitativa dei fenomeni energetici che riguardano l'applicazione in esame, dimostrano che tale guadagno di energia può essere rilevante.

# Bibliografia

- [1] I.E. Idelchik "Handbook of hydraulic resistance" CRC Press Inc. -Begell House - 1994.
- [2] R. Chirulli 'La saldatura ad attrito nella fabbricazione di aste di perforazione per applicazioni nelle opere di ingegneria civile" - Quarry and Construction - Edizioni PEI - ITALIA - Marzo 1996.
- [3] R. Chirulli, M. Dassisti, L. Galantucci "Aste di perforazione frizionate, caratteristiche meccaniche e geometriche delle giunzioni realizzate con tecnica di saldatura ad attrito" - Quarry and Construction - Edizioni PEI -ITALIA - Settembre 1996.