

## CARATTERISTICHE DI RIGONFIAMENTO DELLE LIGNITI (\*)

D. N. D. GOSWAMI (\*\*)

*Sommario* - L'Autore fornisce i risultati di uno studio sul rigonfiamento della lignite. Questo studio ha lo scopo di stabilire se i campioni prelevati a mezzo di sondaggi possano assorbire acqua dal fango di perforazione. Le prove di compressione edometrica effettuate hanno mostrato che l'abbassamento e il rigonfiamento della lignite sono molto variabili. In ogni modo, è stato possibile riconoscere l'esistenza di una correlazione tra il carico di preconsolidamento e il rigonfiamento. Questa correlazione ha permesso di valutare la quantità d'acqua che la lignite può assorbire dal fango di perforazione.

### 1 - Scopo delle indagini

Durante il lavoro di prospezione del bacino lignifero del Mercure (circa 250 km a Sud di Napoli) è stata condotta una estesa e sistematica campagna di sondaggi (FALINI, 1960). Sui numerosi campioni di lignite prelevati mediante carotaggio sono state eseguite le analisi immediate ed elementari. Alcune analisi sono state effettuate anche su campioni tratti dagli scavi e dalle discariche di vecchie miniere. Il confronto dei dati ha indicato che l'analisi dei campioni prelevati nei sondaggi non dà gli stessi risultati di quella condotta su campioni provenienti dalla stessa zona, ma raccolti in modo diverso. La differenza è stata particolarmente sensibile per il contenuto d'acqua, che si è rivelato sistematicamente più alto per i campioni provenienti dai sondaggi.

E' sorto perciò il dubbio che la differenza trovata possa essere dovuta ad assorbimento di acqua dal fango di circolazione, durante le operazioni di carotaggio.

Il presente studio di laboratorio è stato eseguito al fine di confermare tale ipotesi e di stabilire delle possibili relazioni quantitative che consentano di valutare l'aumento del contenuto d'acqua e, di conseguenza, di stimare con maggiore approssimazione il potere calorifico della lignite di un dato bacino.

Sia per le condizioni di giacitura che per il comportamento fisico, la lignite è assimilabile ai terreni sedimentari sciolti a grana fine. Il carbone, come è noto, si rinviene in strati intercalati in serie sedimentarie e può essere completamente o parzialmente consoli-

dato, a seconda degli eventi geologici cui è stato sottoposto.

Come già posto in vista da molti studiosi, il peso dei sedimenti sovrastanti è uno dei più importanti fattori nei processi di consolidazione. Sotto questo peso, la sostanza organica viene costipata e perde parte dell'acqua contenuta inizialmente nel deposito torboso. Se la consolidazione raggiunge lo stadio in cui il contenuto d'acqua si riduce praticamente a zero il processo è irreversibile e, anche se la pressione sovrastante viene completamente annullata, il contenuto d'acqua del carbone rimane invariato.

Al contrario, se il processo di carbonificazione ha raggiunto solo uno stadio iniziale (ligniti), la consolidazione è almeno parzialmente reversibile. Se nel corso della storia geologica di un bacino, parte dei terreni sovrastanti al banco di carbone viene rimossa dall'erosione, il processo di consolidazione si inverte a causa del graduale diminuire della pressione agente e il contenuto d'acqua del carbone aumenta rispetto a quello raggiunto quando i terreni soprastanti avevano la massima altezza.

Durante la perforazione, la pressione che costipava il carbone viene annullata, mentre la carota (e/o i cuttings di perforazione) è ancora sottoposta alla pressione idrostatica dovuta al peso della sovrastante colonna di fango di circolazione.

Per effetto dell'annullamento della pressione la sostanza solida inizialmente compressa tende ad espandersi:

- a) a causa del comportamento elastico delle particelle solide di carbone;
- b) a causa della loro tendenza ad assorbire acqua per processi osmotici;
- c) a causa della forza di espansione dell'acqua capillare intergranulare.

Con la serie di prove di laboratorio si è appunto mirato ad investigare su questi fenomeni ed a determinare la quantità d'acqua che può essere assorbita dalla lignite durante lo scarico.

(\*) Il presente studio è stato eseguito presso l'Istituto di Geologia Applicata e Giacimenti Minerari della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Roma e presso il Centro di Studio per la Geologia Tecnica del C.N.R. ove l'Autore ha seguito dei corsi di perfezionamento grazie ad una borsa di studio del Governo Italiano.

L'articolo, scritto originariamente in inglese, è stato gentilmente tradotto in italiano dal Prof. Ing. Franco ESU; il testo inglese è riportato integralmente dopo il testo italiano.

(\*\*) D. N. D. GOSWAMI M. Sc. e Lecturer in Geology all'Università di Gauhati, Gauhati, Assam (India),

Il fenomeno ha una certa importanza pratica, perché la quantità di acqua che una carota di carbone può assorbire è più elevata di quella che può assorbire un terreno comune. Nel caso della lignite è perciò più difficile ottenere campioni « indisturbati » e, per ottenere valori corretti del contenuto d'acqua naturale, si devono introdurre alcuni fattori di correzione.

## 2 - Materiali impiegati

Per il presente studio di laboratorio sono stati usati campioni provenienti dal bacino del Mercure e prelevati con sondaggi trivellati in zone caratterizzate da un differente spessore dei terreni sovrastanti il banco di lignite.

Sono stati altresì sottoposti alle prove alcuni campioni di lignite di altri bacini, come il bacino di Morcone (presso Benevento, 50 km ad Est di Napoli) e quello di Bastardo (presso Spoleto, 150 km a Nord di Roma).

I campioni differiscono per le caratteristiche macroscopicamente rilevabili quali colore, compattezza, impurità ecc.

La lignite del sondaggio n. 158 (Mercure) è di colore scuro con rare zone di materiale più chiaro. Il campione prelevato in questo sondaggio si presenta sottilmente stratificato. Sono evidenti strutture vegetali ben conservate quali impronte di tessuti foliari. I campioni tendono a dividersi in scaglie dopo essiccamento all'aria.

La lignite del sondaggio n. 171 (Mercure) può essere facilmente polverizzata; i residui dei materiali delle piante originali sono abbondanti; la tessitura è terrosa e si osservano frequenti straterelli di sostanze non carboniose.

I campioni del sondaggio n. 568 contengono un discreto quantitativo di impurità; i residui di piante sono scarsi.

Più ricchi di impurità appaiono i campioni del sondaggio n. 548; in questi campioni sono tuttavia ben conservati frammenti di strutture legnose; il materiale è molto consistente.

Il contenuto d'acqua (espresso come percentuale sul peso della sostanza secca) ed il contenuto di ceneri dei diversi campioni sono:

Sondaggio	Profondità m s.p.c.	Contenuto H <sub>2</sub> O <sup>1</sup>	Ceneri <sup>2</sup>
171	35 - 38	58% - 146%	21.20%
158	34 - 37	107% - 163%	9.18%
249	9 - 12	122% - 140%	10.18%
568	35 - 38	97% - 100%	26.35%
548	18 - 21	96% - 136%	24.22%

## 3 - Prove di laboratorio

Lo studio sulla compressibilità e sul rigonfiamento della lignite è stato condotto su provini cilindrici (diametro 70 mm o 50 mm, altezza da 15 a 20 mm) con l'ausilio di un edometro.

I provini sono stati ricavati dalle carote; alcuni

con l'asse parallelo, altri con l'asse normale a quello della carota (1).

Per alcune delle prove di consolidamento, il carico sul provino è stato gradualmente aumentato da zero fino ad un massimo e quindi diminuito gradualmente.

Altri provini sono stati costipati direttamente sotto un carico elevato e quindi scaricati per determinare il valore del rigonfiamento totale e la velocità di rigonfiamento.

In questi due tipi di prove, il materiale è stato mantenuto in contatto con acqua, sia durante il carico, che durante lo scarico.

Altri provini sono stati sottoposti alla compressione, senza contatto con acqua, per determinare se essi mostravano una sensibile riduzione dell'umidità per il semplice effetto dell'applicazione del carico, e per trovare se il loro contenuto d'acqua fosse minore (e il peso dell'unità di volume maggiore) di quello dei campioni che potevano rigonfiare in presenza di acqua. Questo tipo di prove non ha però fornito dati attendibili.

Sui campioni di Morcone e di Bastardo sono state eseguite prove edometriche, seguendo la tecnica comunemente adottata.

## 4 - Presentazione dei risultati

La compressibilità della lignite esaminata è simile a quella di altri materiali della stessa specie (ligniti, torbe), già studiati (ESU, 1960). I diagrammi abbassamenti-tempo, tracciati in grafico semilogaritmico, sono praticamente rettilinei (Fig. 1).

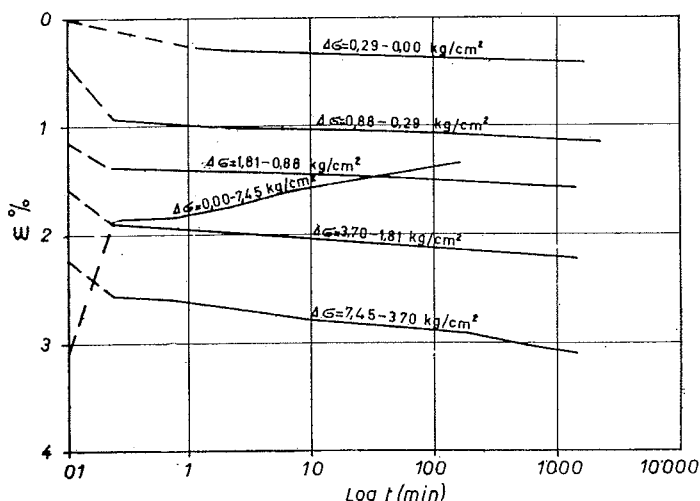


Fig. 1 - Diagrammi dei cedimenti (e) in funzione del tempo (t). Lignite del bacino del Mercure, campione 158.

- Sample 158 (lignite of the Mercure basin). Settlements (e) vs. logs of time (t).

I diagrammi del costipamento in funzione del carico indicano che le ligniti sono state consolidate in situ

(1) Gli strati di lignite dai quali sono state prelevate le carote sono generalmente orizzontali (inclinazione minore di 15°); perciò gli assi delle carote erano, di regola, quasi normali alla stratificazione delle formazioni.

sotto pressioni maggiori di quelle corrispondenti alla pressione litostatica attualmente agente (Figg. 2 e 3).

E' da rilevare che il comportamento quantitativo delle ligniti esaminate differisce notevolmente da campione a campione ed anche da una parte all'altra di uno stesso campione.

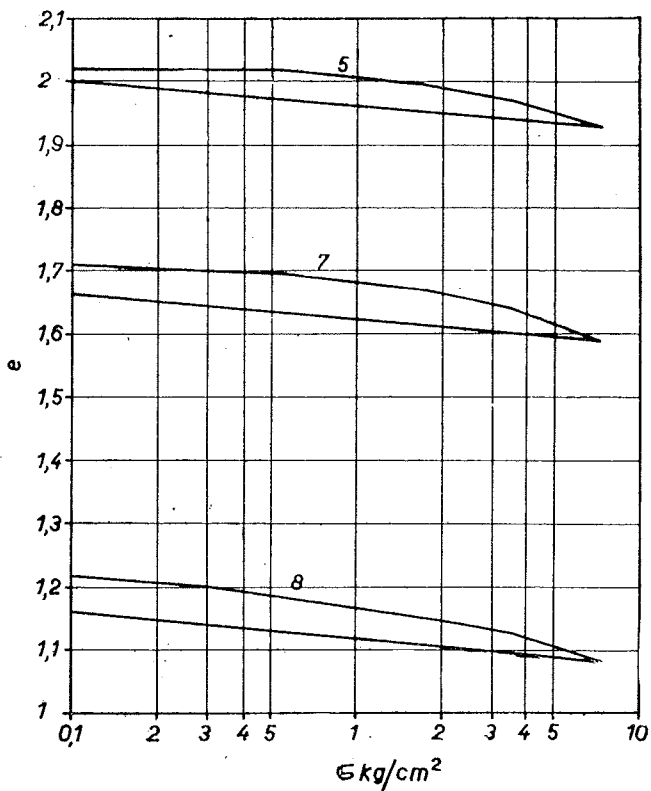


Fig. 2 - Diagrammi di compressione. Lignite del bacino del Mercure, campione 158. ( $e$  = indice di porosità;  $\sigma$  = pressione applicata).  
- Sample 158 (Mercure). Compression diagrams. ( $e$  = void ratio;  $\sigma$  = applied pressure).

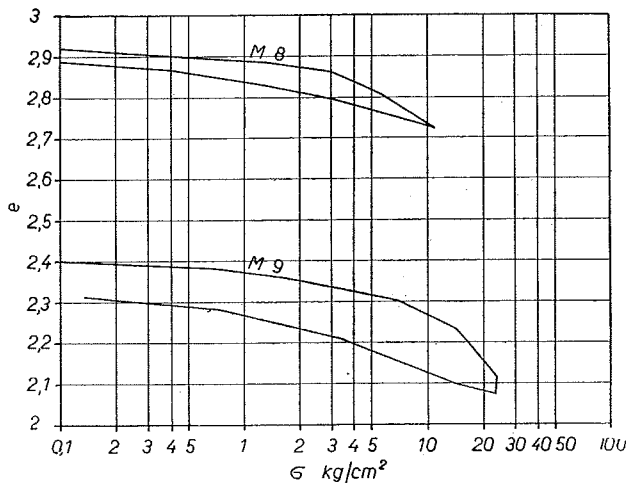


Fig. 3 - Diagrammi di compressione. Lignite del bacino di Morcone (Benevento), campioni 562 (M 8) e 550 (M 9) ( $e$  = indice di porosità;  $\sigma$  = pressione applicata).  
- Samples 562 (M 8) and 550 (M 9) from Morcone. Compression diagrams ( $e$  = void ratio;  $\sigma$  = applied pressure).

Il contenuto d'acqua  $w$  ed il peso dell'unità di volume  $\gamma$  dei campioni esaminati variano entro limiti piuttosto ampi (contenuto d'acqua tra 60 e 160%; peso dell'unità di volume da 1,05 a 1,55 g/cm<sup>3</sup>). Le due caratteristiche sono molto ben correlate: contenuti d'acqua alti corrispondono a bassi pesi dell'unità di volume e viceversa. Questa correlazione è ovviamente dovuta all'influenza del diverso contenuto di sostanza minerale (« ceneri ») presente nei campioni. In verità la sostanza minerale, se confrontata con la sostanza organica, ha un peso specifico molto più alto ed una capacità di assorbire acqua molto più bassa; perciò le ligniti con alto contenuto di ceneri hanno un elevato peso dell'unità di volume ed un basso contenuto d'acqua.

Il peso dell'unità di volume e il contenuto d'acqua dei campioni sottoposti alle prove non sono distribuiti uniformemente entro i limiti sopradetti. Essi sembrano invece riunirsi in tre diversi gruppi: il primo con circa  $\gamma = 1,45$  g/cm<sup>3</sup> e  $w = 70\%$ ; il secondo con  $\gamma = 1,25$  g/cm<sup>3</sup> e  $w = 100\%$ ; il terzo con  $\gamma = 1,10$  g/cm<sup>3</sup> e  $w = 130\%$ .

Benché la correlazione tra  $\gamma$  e  $w$  sia ottima ed altamente significativa, l'insieme di curve tracciate in diagramma (Fig. 4) mostra che la legge di correlazione non è perfettamente lineare.

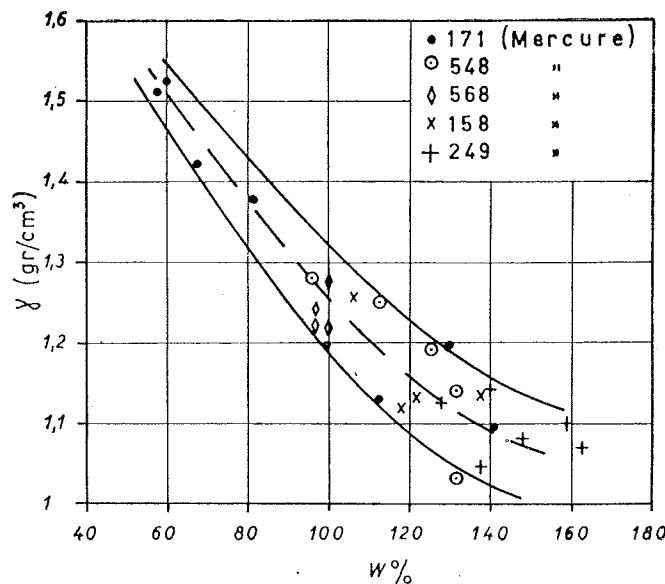


Fig. 4 - Peso dell'unità di volume ( $\gamma$ ) in funzione del contenuto d'acqua naturale ( $w$ ). Campioni di lignite del bacino del Mercure.  
- Lignite of the Mercure basin. Unit weight ( $\gamma$ ) vs. water content ( $w$ ).

Inoltre i singoli dati ( $\gamma$ ,  $w$ ) sono dispersi entro un intervallo variabile di circa  $\pm 10\%$  dei valori dati dalla linea di regressione. Ciò può essere ragionevolmente attribuito alle variazioni di qualità, sia della sostanza organica che di quella minerale; entrambe, infatti, possono essere più o meno « colloidali ».

I risultati quantitativi delle prove di compressibilità sono molto dispersi, il massimo abbassamento  $\epsilon_M$  (da-

to da  $\epsilon_M = \frac{H_0 - H_m}{H_0} \cdot 100$ , dove  $H_0$  = altezza del provino;  $H_m$  = altezza del provino sotto il carico massimo) è diverso da campione a campione, a parità di carico applicato.

Le prove hanno tuttavia indicato che i campioni 171 e 249 possiedono una compressibilità maggiore degli altri.

Poiché il peso dell'unità di volume può essere assunto come indice dell'abbondanza di sostanza minerale, si è ricercato se esista una correlazione tra  $\gamma$  e la compressibilità del materiale. Per questo scopo, il massimo abbassamento (sotto un carico pressoché eguale per tutte le prove) è stato assunto come indice della compressibilità del materiale.

E' risultato che per i campioni tagliati normalmente all'asse della carota, il massimo abbassamento  $\epsilon_M$  è significativamente correlato con il peso dell'unità di

volume (Fig. 5). Come prevedibile la correlazione è inversa; i campioni con elevato peso specifico sono infatti meno compressibili. Al contrario, i campioni paralleli all'asse della carota mostrano che l'abbassamento massimo è più elevato per i campioni con maggiore peso dell'unità di volume (Fig. 6).

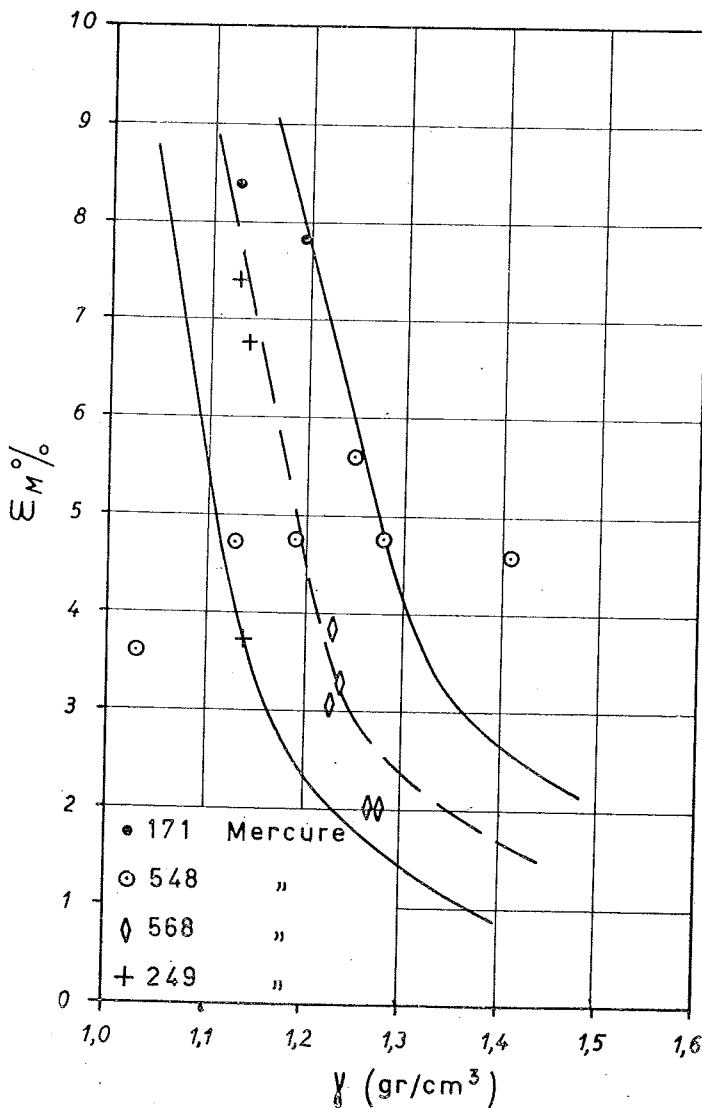


Fig. 5 - Cedimento massimo ( $\epsilon_M$ ) in funzione del peso dell'unità di volume ( $\gamma$ ) per i campioni di lignite del bacino del Mercure. Campioni tagliati normalmente all'asse della carota.  
- Lignite of the Mercure basin. Axis of the sample normal to the axis of the core. Maximum settlement ( $\epsilon_M$ ) vs. unit weight ( $\gamma$ ).

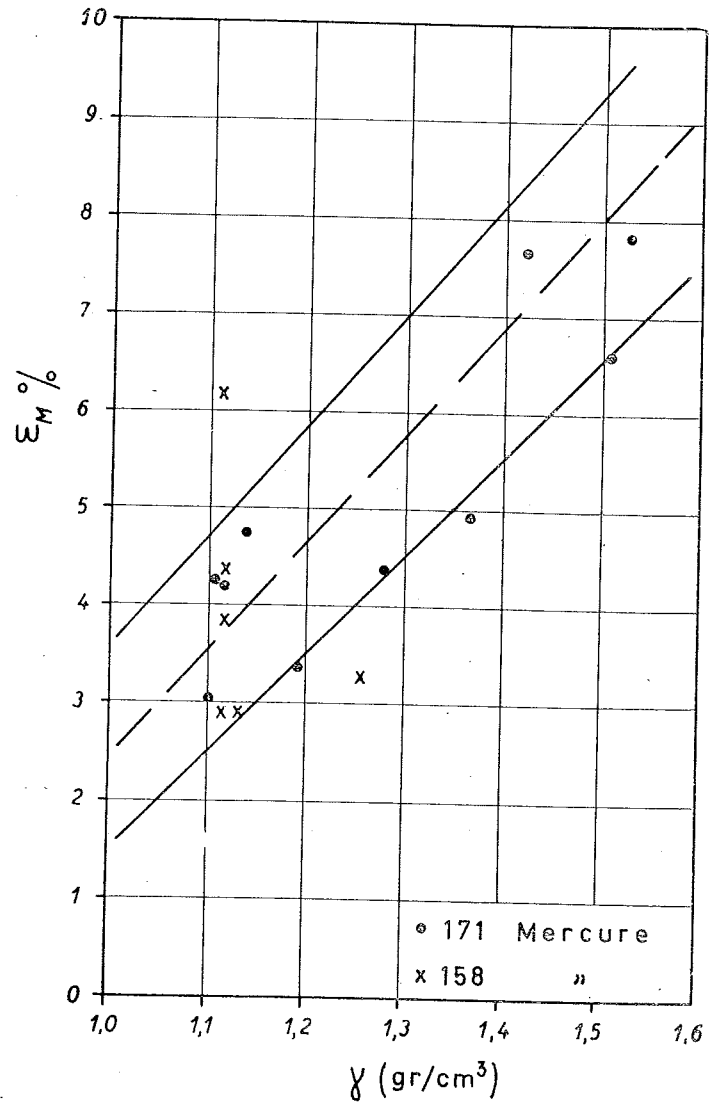


Fig. 6 - Cedimento massimo ( $\epsilon_M$ ) in funzione del peso dell'unità di volume ( $\gamma$ ) per i campioni di lignite del bacino del Mercure. Campioni tagliati parallelamente all'asse della carota.

- Lignite of the Mercure basin. Axis of the sample parallel to the axis of the core. Maximum settlement ( $\epsilon_M$ ) vs. unit weight ( $\gamma$ ).

Ciò potrebbe essere dovuto alla presenza di fini fratture parallele alla stratificazione della lignite; la correlazione trovata appare però dubbia se si considera che i campioni ad alto peso specifico ( $\gamma \geq 1,4 \text{ g/cm}^3$ ) possono essere difficilmente considerati come vere ligniti.

La variazione di altezza conseguente allo scarico

(espressa da  $\epsilon_R = \frac{H_f - H_m}{H_0} \cdot 100$ , con  $H_f$  = altezza finale del provino) è rilevante.

I valori di tale variazione sono anch'essi molto dispersi; tuttavia sembra esistere una relazione definita tra il peso dell'unità di volume del campione e il valore della variazione d'altezza (per campioni costipati sotto carichi confrontabili); l'orientazione del campione sembra avere solo un'influenza trascurabile.

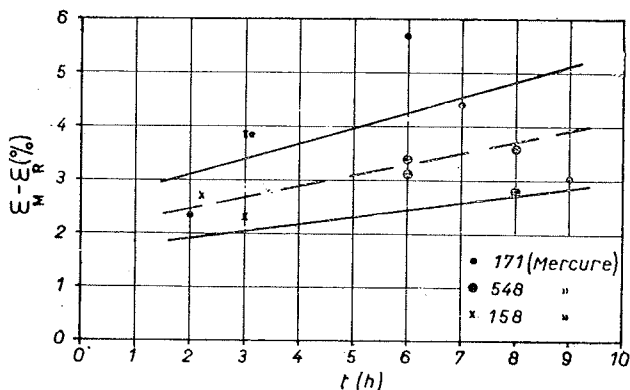


Fig. 7 - Correlazione tra rigonfiamento ( $\epsilon_M - \epsilon_R$ ) e durata della prova ( $t$ ) (ligniti del bacino del Mercure).  
- Lignite of the Mercure basin. Swelling ( $\epsilon_M - \epsilon_R$ ) vs. time ( $t$ ).

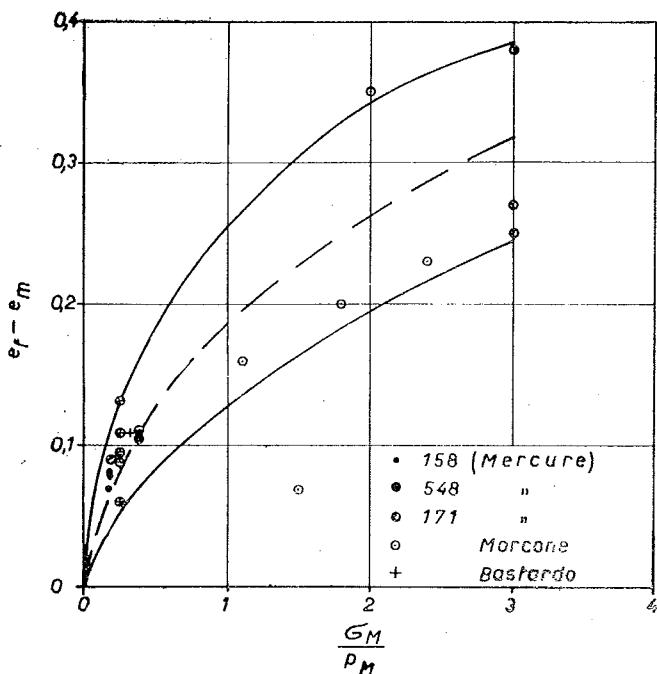


Fig. 8 - Rigonfiamenti dopo lo scarico espressi in funzione del rapporto tra la massima pressione raggiunta durante la prova ( $\sigma_M$ ) e la pressione di consolidamento dovuta a fattori geologici ( $p_M$ ) ( $e_f$  = indice di porosità finale dopo lo scarico;  $e_m$  = indice di porosità minimo).  
- Swelling subsequent unloading vs. ratio between maximum test pressure ( $\sigma_M$ ) and pre-consolidation ( $p_M$ ) ( $e_f$  = final void ratio after unloading;  $e_m$  = minimum void ratio).

Una buona correlazione esiste tra l'entità del rigonfiamento e il tempo durante il quale i campioni sono rimasti a contatto con l'acqua dopo lo scarico (Fig. 7).

Come si può vedere dalla Tab. I (2), la variazione di volume (espressa dalla differenza tra gli indici di porosità sotto carico e dopo scarico) aumenta con la pressione applicata nella prova; alti valori del rigonfiamento vengono raggiunti quando la pressione applicata ( $\sigma_M$ ) è maggiore del valore della pressione di consolidamento in sito ( $p_M$ ) (3); tuttavia, anche se la massima pressione impiegata nelle prove è minore della pressione di consolidamento, l'ordine di grandezza della variazione, benché piccolo, rimane apprezzabile (Fig. 8) anche per piccoli valori del rapporto  $\sigma_M/p_M$ . L'aumento del contenuto d'acqua dipendente dal rigonfiamento giunge sino al 15-20% quando  $\sigma_M \gg p_M$ , mentre è di regola inferiore al 10% per  $\sigma_M < p_M$  (Fig. 9).

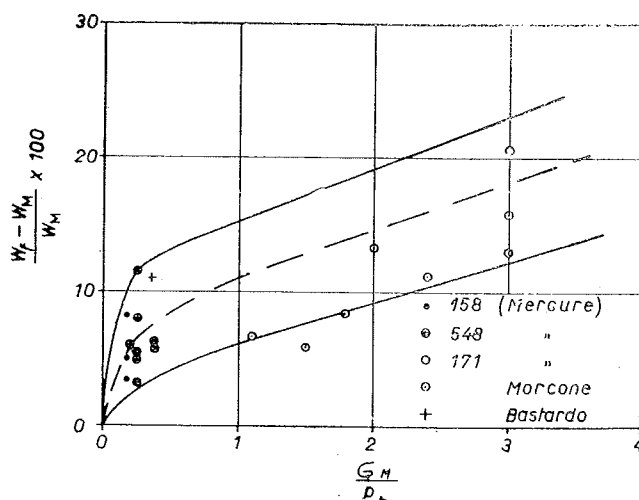


Fig. 9 - Aumento del contenuto d'acqua conseguente allo scarico in funzione del rapporto tra pressione massima di prova e pressione di consolidamento in sede dovuta a fattori geologici ( $w_f$  = contenuto d'acqua finale;  $w_m$  = contenuto d'acqua minimo;  $\sigma_M$  = massima pressione di prova;  $p_M$  = pressione di consolidamento in sede).  
- Increase of water content vs. ratio between maximum test pressure and pre-consolidation pressure ( $w_f$  = final water content;  $w_m$  = minimum water content;  $\sigma_M$  = maximum test pressure;  $p_M$  = pressure of pre-consolidation due to geological factors).

I risultati delle prove confermano che una differenza di contenuto d'acqua può esistere tra campioni raccolti con perforazioni e campioni raccolti in altri modi.

I risultati del presente studio potrebbero cioè essere impiegati per stimare l'aumento del contenuto d'acqua di un campione durante la operazione di carotaggio.

E' molto verosimile, infatti, che il comportamento della lignite sia riprodotto con le prove di consolidamento di laboratorio. Perciò appare ragionevole ammettere che l'indice di porosità (così come la legge di rigonfiamento) della lignite in sito sia poco diverso da quello ricavato dalle prove.

(2) Nella tabella sono riportati anche i risultati di precedenti prove sulla compressibilità delle ligniti (Esu, 1960).

(3) La pressione di consolidamento alla quale la lignite è stata assoggettata durante la sua storia geologica è stata ricavata dalla variazione di compressibilità sotto carico (Esu, 1960).

TABELLA I

Son- daggio	Profon- dità m	Prova n°	$p_o$ kg/cm <sup>2</sup>	$p_M$ kg/cm <sup>2</sup>	$e_i$	$w_i$ %	$\sigma_M$ kg/cm <sup>2</sup>	$e_m$	$w_M$ %	$e_f$	$w_f$ %	$e_f - e_m$	$w_f - w_m$
158	34-37	5	6.10	40	2.02	146	7.30	1.93	142	2.00	147	0.07	5
158	34-37	7	6.10	40	1.71	129	7.30	1.59	120	1.66	136	0.08	6
158	34-37	8	6.10	40	1.22	98	7.30	1.08	86	1.16	93	0.08	7
171	35-38	1	6.00	40	2.10	131	9.90	2.00	124	2.06	128	0.06	4
171	35-38	12	6.00	40	1.36	61	9.90	1.17	52	1.30	58	0.13	6
171	35-38	14	6.00	40	1.82	129	9.90	1.69	120	1.78	126	0.09	6
171	35-38	45	6.00	40	1.74	99	9.90	1.62	92	1.71	97	0.09	5
171	35-38	16	6.00	40	1.61	82	9.90	1.48	75	1.59	81	0.11	6
548	18-21	28	3.40	50	1.85	118	19.20	1.72	112	1.83	119	0.11	7
548	18-21	29	3.40	50	1.87	109	9.90	1.43	100	1.82	106	0.09	6
548	18-21	32	3.40	50	1.70	97	19.20	1.47	85	1.56	90	0.11	5
562 M.	11-14	A (*)	2.00	10-15	3.10	165	20.00	2.60	142	2.95	161	0.35	19
562 M.	11-14	B (*)	2.00	10-15	2.71	148	18.00	2.38	130	2.58	141	0.20	11
562 M.	11-14	C (*)	2.00	10-15	2.60	142	30.00	1.87	102	2.25	123	0.38	21
542 M.	51-54	D (*)	10.00	10-15	2.55	136	30.00	2.00	108	2.27	122	0.27	14
542 M.	51-54	E (*)	10.00	10-15	2.07	112	30.00	1.64	88	1.89	102	0.25	14
542 M.	51-54	F (*)	10.00	10-15	2.10	113	15.00	1.92	103	1.99	109	0.07	6
542 M.	51-54	G	10.00	10-15	1.76	95	50.00	1.01	54	1.55	84	0.54	30
562 M.	11-14	H	2.00	10-15	2.92	159	11.00	2.73	149	2.89	159	0.16	10
550 M.	26-29	I	5.00	10-15	2.40	132	24.00	2.08	115	2.31	128	0.23	13
139	10-11	L	2.00	20	1.00	51	7.30	0.88	45	0.97	50	0.11	5

NOTE  
NOTES

- I sondaggi 158, 171, 548 sono stati perforati nel bacino del Mercure.  
Bore-holes 158, 171, 548 were drilled in the Mercure basin.
- I sondaggi 542, 550, 562 sono stati perforati nel bacino di Morcone.  
Bore-holes 542, 550, 562 were drilled in the Morcone basin.
- Il foro 139 è stato perforato nel bacino di Bastardo.  
Bore-hole 139 was drilled in the Bastardo basin.
- Le prove A(\*) ÷ F(\*) furono eseguite da Esu (vedi bibliografia).  
Tests A(\*) ÷ F(\*) were executed by Esu (see references).

ELENCO DEI SIMBOLI  
LIST OF SYMBOLS

- $p_o$  = pressione litostatica;  
actual overburden pressure (kg/cm<sup>2</sup>);
- $p_M$  = pressione di costipamento in sede;  
pressure of pre-consolidation due to geological factors  
(kg/cm<sup>2</sup>);
- $e_i$  = indice di porosità iniziale;  
initial void ratio;
- $w_i$  = umidità iniziale;  
initial water content;
- $\sigma_M$  = massima pressione di prova;  
maximum test pressure;
- $e_m$  = indice di porosità minimo;  
minimum void ratio;
- $w_M$  = umidità minima  
minimum water content;
- $e_f$  = indice di porosità finale dopo lo scarico;  
final void ratio after unloading;
- $w_f$  = contenuto d'acqua finale;  
final water content;
- $e_f - e_m$  = rigonfiamento dovuto allo scarico;  
rebound due to unloading;
- $w_f - w_M$  = aumento del contenuto d'acqua dovuto allo scarico;  
increase in water content due to unloading.

I diagrammi di compressione mostrano che i campioni consolidati sotto pressioni massime ( $\sigma_M$ ) più basse della pressione di preconsolidamento ( $p_M$ ) sono scarsamente compressibili (Fig. 2), e che la compressione permanente è pressoché nulla.

La compressibilità aumenta se le pressioni di prova sono uguali (o maggiori) al carico di pre-consolidamento (Fig. 3, Esu, 1960).

Inoltre, nel primo caso di rigonfiamento è piccolo mentre diventa apprezzabile nel secondo.

Quindi, se la pressione litostatica attuale è più bassa del massimo carico di pre-consolidamento, l'espansione conseguente all'operazione di carotaggio sarà piccola. Al contrario, se la pressione litostatica attuale è uguale al carico di pre-consolidamento, l'espansione potrà essere rilevante.

Dal grafico di Fig. 9 è possibile avere un'idea circa il valore dell'aumento di contenuto d'acqua dipendente dall'espansione.

Dai diagrammi sperimentali del rigonfiamento in funzione del tempo, si può dedurre che l'espansione e l'assorbimento di acqua dall'ambiente circostante ha luogo in breve tempo; infatti più della metà del rigonfiamento totale avviene in meno di un'ora; questo tempo è sicuramente minore di quello occorrente per tagliare una carota ed estrarla dal foro.

Nelle operazioni di carotaggio, in confronto con le esperienze di laboratorio, il rigonfiamento e l'assorbimento d'acqua può anche essere accelerato dal fatto che il campione, una volta separato dalla formazione, rimane in contatto con un liquido (il fango di circolazione) che ha una pressione anche maggiore della pressione idrostatica dell'acqua sotterranea. L'aumento del contenuto d'acqua risulta, in media, dell'ordine del 4%, con possibili variazioni dipendenti dalla natura della lignite, entro un intervallo del 2-6%.

Tale valore, benché basso, non è trascurabile nella stima del potere calorifico di una lignite per usi industriali.

## 5 - Conclusioni

I risultati delle prove mostrano:

- le ligniti esaminate hanno caratteristiche molto differenti nei diversi punti dello stesso bacino; questa variabilità influenza il comportamento studiato;
- la compressibilità sembra essere correlata col peso dell'unità di volume e dipendente dall'orientazione del campione;
- il rigonfiamento conseguente allo scarico aumenta se il carico applicato aumenta;
- è da prevedere che durante il prelievo del campione dal foro da sonda, il contenuto d'acqua della lignite aumenti a causa dell'espansione del campione;
- l'aumento del contenuto d'acqua è piccolo ma non trascurabile dal punto di vista della valutazione del potere calorifico, fino a che il carico agente sullo strato è minore del carico di preconsolidamento geologico; l'aumento di contenuto d'acqua può essere maggiore se la pressione litostatica attuale è dello stesso ordine di grandezza della pressione di pre-consolidamento.

## Bibliografia

- ESU F., 1960 - *Indagini sulla compressibilità della lignite di Morcone* - Geotecnica, 7: 4: 159.
- FALINI F., 1960 - *Sulle condizioni di formazione dei giacimenti limnici di combustibili fossili* - Atti Acc. Naz. dei Lincei, A. CCCLVII: S. VIII: Vol. VII, sez. II, Fasc. I.

## A STUDY OF THE SWELLING CHARACTERISTICS OF BROWN-COALS

by D. N. D. GOSWAMI, M. Sc.

### 1 - Aim of the experiments

During the process of prospecting of brown-coal in the basin of Mercure (some 250 km South of Naples, Italy) an extensive and systematic drilling campaign was carried out (FALINI, 1960). Many samples were taken through conventional bottom hole core recovery. Both proximate and ultimate analyses of the brown-coal have been carried out on many of the core samples. A few analyses were carried on samples taken from trenches and from old mine drifts. Comparison of the data indicated that the analyses of the core samples did not always give the same results of those made on samples coming from the same area but taken by different means. The difference was particularly remarkable for the moisture content, which seemed systematically higher for the drilling core samples.

It was suspected that the found discrepancy might be due to absorption of water from the drilling mud during the process of coring.

The present laboratory investigation was planned with the aim of confirming such hypothesis and of establishing possible quantitative relationship; the final goal being that of allowing a more approximate evaluation of the calorific value of the brown coal of a deposit.

As for the mode of occurrence and the qualitative physical behaviour, brown coal are in many respects comparable to loose, fine-grained, sedimentary soils. Coal, as it

is well known, occurs in layers interbedded within sedimentary sequences and may be fully or partially consolidated, according to the geological factors involved in the diagenetic processes it underwent.

As already pointed out by many students of the coal origin, the weight of the overburden sediments is one of the more important factors in the processes of consolidation. Under its action the organic matter is compacted and loses part of the water originally contained in the peat deposit. If the consolidation reaches the stage when the moisture content is reduced near zero ("pitch coal" or "sub-bituminous coals") the process is irreversible and, even if the overburden pressure is completely removed, the moisture content of the coal does not vary any more. On the contrary, if the process of coalification only reached a lower stage (brown coals, lignites), the consolidation remains partly reversible. Indeed, if, throughout the geological history of a basin, part of the overburden is later removed by the erosion, because of the gradual relief of the pressure acting on the seam the process of consolidation reverses and the moisture content of the coal increases above that already reached when the overburden had its maximum height.

During the process of drilling, the pressure which compacted the coal is completely removed while the core (and/or the cuttings of the drilling) is still submitted

to a hydrostatic liquid pressure due to the weight of the superimposed column of drilling mud.

Due to the unloading of the consolidation pressure the compressed solid matter tends to expand:

a) because of the elastic behaviour of the solid coal particles;

b) because of their tendency to absorb some water by osmotic process;

c) because of the expanding force of the intergranular, capillar water.

The amount of water that can be adsorbed by the brown coal during this process was studied through a series of laboratory experiments.

The examined phenomenon has some practical importance too, because the amount of water a coal core may adsorb is much higher than that an ordinary soil may adsorb. In the case of brown coal is therefore more difficult to obtain "undisturbed" samples. In order to get correct figures, some correction factors should be introduced.

## 2 - Materials employed

For the present laboratory investigations core samples from five different zones of the Mercure basin were used, each corresponding to a different thickness of overburden.

A few samples of brown coal from other basins, namely the basin of Morcone (near Benevento, 50 km East of Naples) and Bastardo (near Spoleto, some 150 km North of Rome) were also tested.

The samples differ in physical characters like colour, compactness, impurities, etc.

The brown coal of the bore-hole n° 158 (Mercure) is dark in colour with occasional specks of brownish material. The core sample from this bore-hole shows thin parallel bedding. Well preserved vegetable structures such as impressions of leaf tissues are evident. The coal samples tend to disintegrate when exposed to the air.

The brown coal of the bore-hole n° 171 (Mercure) differs from n° 158: the samples can be easily powdered; remnants of original plant materials are more conspicuous; texture is essentially earthy; occasional bands of impurities are not uncommon.

Comparatively, samples from the bore-hole n° 568 show more impurities. Plant debris are not abundant in these samples.

Less impurities are present in the samples from the bore-hole n° 548. Fragments of woody structures are well preserved in these samples. The coal appears to be harder.

Water content (expressed as percentage of the weight of the solid matter) and ash content of the different samples resulted within the following ranges:

Bore-hole	Depth m	Water content	Ash content
171	35 - 38	58% - 146%	21.20%
158	34 - 37	107% - 163%	9.18%
249	9 - 12	122% - 140%	10.18%
568	35 - 38	97% - 100%	26.35%
548	18 - 21	96% - 136%	24.22%

## 3 - Experimental Work

The investigation on the compressibility and on the swelling of the brown coal was carried out on cylindrical samples (diameter 70 mm or 50 mm, height 15 to 20 mm) with the help of an oedometer.

The samples were cut from the cores: some with their axis parallel to that of the core; some others normal to it (1).

For part of the consolidation test the load on the specimen was gradually increased from zero up to a maximum and then gradually removed.

For another part of the tests, the samples were directly compressed under the maximum load and then unloaded to determine the total amount and the velocity of swelling; the final water content was also determined.

(1) The brown coal seams of the deposits from which the examined samples had been drawn are generally flat (less than 15° inclination); therefore the axis of the samples were, as a rule, almost normal to the geological bedding of the formations.

In these two kind of tests, the samples were in contact with water during both loading and unloading.

Other samples were subjected only to compression with the aim to determine whether they showed a sensible reduction of water content by the effect of the applied load, and to find out whether their final water content would be lower (and unit weight higher) than that of samples allowed to swell in contact with water.

Conventional oedometric test have been carried out on the samples from Morcone and from Bastardo.

## 4 - Presentation of the results of the investigations

The compressibility of the examined brown coal is similar to that of other materials of the same kind (brown coals, peat), already studied (Esu, 1960). The settlement-time diagrams, plotted in a semilog graph ( $\epsilon$ ,  $\log t$ ) are indeed very close to straight lines (Fig. 1).

The diagrams representing compaction vs. load show that the coals had been consolidated in situ under pressures always greater than that due to the present overburden (Fig. 2 and Fig. 3).

We must point out that the quantitative behaviour of the examined brown coals notably differs from sample to sample and also from one part to another of the same sample.

The water content and the unit weight of the tested samples vary within rather wide limits (water content  $w$  between 60 and 160%; unit weight  $\gamma$  between 1.05 and 1.55 g/cm<sup>3</sup>).

The two characteristics are quite well correlated (Fig. 4): high water contents correspond with low unit weights and vice-versa.

This correlation is obviously due to the influence of the variable amount of mineral matter ("ashes") contained in the different samples.

Indeed, the mineral matter, as compared with organic matter, has a much higher specific gravity and a far lower capacity of water absorption; therefore impure brown coals have a high unit weight and a low water content.

The unit weight and water content of the tested samples are not uniformly distributed within the said ranges. They seem instead to cluster in three different groups: a first one around  $\gamma = 1.45$  g/cm<sup>3</sup> and  $w = 70\%$ ; a second one around  $\gamma = 1.25$  g/cm<sup>3</sup> and  $w = 100\%$ ; a third group around  $\gamma = 1.10$  g/cm<sup>3</sup> and  $w = 130\%$ .

Although the correlation between  $\gamma$  and  $w$  is excellent and highly significant, the trend line outlined in diagram (Fig. 4) shows that the law of correlation is not perfectly linear.

Moreover, the single data ( $\gamma$ ,  $w$ ) are scattered within a range amounting about to  $\pm 10\%$  of the values given by the regression line. This may be reasonably attributed to the variations of the quality of both the organic matter and of the mineral matter; both, indeed, can be more or less "colloidal" according with their nature.

The quantitative results of the compressibility tests are widely scattered. The maximum settlement  $\epsilon_M$  (given by

$$\epsilon_M = \frac{H_0 - H_m}{H_0} \cdot 100, \text{ where } H_0 = \text{height of the specimen;}$$

$H_m = \text{height of the specimen under the maximum load}$ ) is different from sample to sample.

In spite of the scattering of the results the tests proved that samples n° 171 and n° 249 have a compressibility greater than that of the other ones.

Since the unit weight of the material can be assumed as an index of the abundance of mineral matter, it was tested whether there was any correlation between  $\gamma$  and the compressibility of the material. For this purpose, the maximum settlement (under almost the same load) was assumed as an index of the compressibility of the material.

At least for the samples cut normal to the axis of the core, the maximum settlement  $\epsilon_M$  resulted significantly correlated with the unit weight (Fig. 5). As expected the correlation is inverse, the high-density samples being less compressible. On the contrary, the samples parallel to the axis of the core seem to show that the maximum settlement is higher for the samples having a higher unit weight (Fig. 6).



This may seem surprising, but could be explained by the presence of some fine cracks parallel to the bedding of the coal; moreover the correlation would appear much more doubtful for those samples with high specific gravity ( $> 1.4 \text{ g/cm}^3$ ) that can be hardly considered as true brown coals.

The swelling consequent to unloading is relevant.

The values of the swelling are scattered too; however a definite relationship seems to exist between the unit weight of the sample and the value of the swelling (after comparable loads), whereas the orientation of the sample appears to have only a negligible influence.

A fairly good correlation exists between the amount of swelling and the time during which the samples were allowed to remain in contact with water after unloading (Fig. 7).

As can be seen from Table I (2), the swelling (given as difference between void ratio under load and after unloading) increases as the pressure applied during the test grows; high values of the swelling are reached when the applied pressure ( $\sigma_M$ ) becomes greater than the value of the pressure of consolidation in situ ( $p_M$ ) (3); however even when the maximum pressure employed during the tests is less than the consolidation pressure the amount of the swelling, although small, remains appreciable (Fig. 8) even for small values of the ratio  $\sigma_M/p_M$ . The increase of water content consequent to the rebound goes as far as  $15 \div 20\%$  when  $\sigma_M \gg p_M$ , while it is commonly less than  $10\%$  for  $\sigma_M < p_M$  (Fig. 9).

The results of the tests therefore confirm that a difference in water content must exist between samples recovered from drill holes and samples taken with other means.

The results of the present investigation could be employed to obtain an estimate (even if a rough one) of the increase in water content that a sample may undergo during the operation of coring.

It seems indeed very likely that the behaviour of the brown coal can be fairly closely reproduced by the laboratory consolidation tests. Namely it appears reasonable to admit that the void ratio (as well as the law of swelling) of the brown coal in situ is very similar to that given by the tests.

The compression diagrams show that samples consolidated under pressures ( $\sigma_M$ ) lower than the pre-consolidation pressure ( $p_M$ ) have small compressibility (Fig. 2) and that, once the sample is unloaded, almost no permanent compression remains.

The compressibility grows when the test pressures equal (or are greater than) the pre-consolidation load (Fig. 3, Esu, 1960).

Moreover, in the former case, the swelling is little, whereas it becomes appreciable in the second one.

Thus, if the actual overburden pressure is lower than the maximum pre-consolidation load, the expansion con-

(2) In table I the results of previous tests on compressibility of brown coal (Esu, 1960) are also reported.

(3) The consolidation pressure to which the lignite had been subjected during his geological history were derived from the change of compressibility under load; details about this procedure are given by Esu, 1960.

## A STUDY OF THE SWELLING CHARACTERISTICS OF BROWN-COALS

*Summary* - The Author deals with the swelling properties of the brown coal. The study is aimed to find out if, during the recovery operations of samples from drilled holes, the brown coal may absorb some moisture from the drilling mud. On this purpose the A. has carried out some oedometric consolidation tests on samples of brown coal. The tests have shown that the maximum settlement and the swelling of the brown coal vary within wide limits. Nevertheless it has been possible to ascertain the existence of a fairly good correlation among the pre-consolidation load and the amount of swelling the brown coal may show when unloaded. From this correlation it has been possible to make an estimate of the amount of water that a sample may absorb during the coring in a drilled hole.

sequent to the operation of coring will be small. On the contrary, if the actual overburden equals the pre-consolidation load the expansion will be great.

From graph of Fig. 9 it is possible to have an idea about the value of the increase in water content depending upon the expansion.

From the experimental diagrams of swelling as a function of time, it can be deduced that expansion and absorption of water from the surroundings take place in a short time; indeed, more than half of the final expansion is gained in less than one hour; this time is positively smaller than that necessary to cut a core and to run it out of the hole.

In actual coring operations, as compared with laboratory experiments, swelling and absorption of water may even be accelerated by the fact that the sample, once cut from the formation, remains in contact with a liquid (the drilling mud) having a pressure greater than the hydrostatic pressure of the groundwater (if any) previously existing. The increase of water content results, as an average, in the order of  $4\%$ , with possible variations, depending on the nature of the brown coal, within the range of  $2-6\%$ .

This figure, although low, is not negligible in estimating the calorific value of a brown coal for industrial uses.

## 5 - Conclusions

The results of the tests show:

1) the examined brown coals have widely different characteristics even in different point of the same basin; this variability influences the investigated behaviour;

2) the compressibility appears to be correlated with the unit weight and depending on the orientation of the sample;

3) the swelling subsequent to unloading increases when the applied load increases;

4) it must be expected that during the recovery operation of the sample from bore-hole, the water content of the brown coal increases, due to the expansion of the sample;

5) the increase in water content is small (a few percents) but not negligible from the point of view of the evaluation of the calorific value as far as the load acting upon the seam is lower than the geological pre-consolidation load; the increase in water content may be higher if the actual overburden pressure is of the same order of magnitude of the preconsolidation pressure.

## 6 - Acknowledgements

This study was carried out in the *Centro Studi di Geologia Tecnica* of the *Italian National Council of the Researches* and in the *Institute of Applied Geology and Mineral Deposits*, Faculty of Engineering, University of Rome. Thanks are due to Prof. F. PENTA, Prof. F. FALINI and Ing. F. ESU for all the facilities they offered to carry out the study.

## ÉTUDE SUR LE GONFLEMENT DES LIGNITES

*Sommaire* - L'Auteur donne ici les résultats d'une étude sur le gonflement de la lignite. Cet étude avait le but de établir si les échantillons prélevés au moyen de sondages peuvent absorber de l'eau de la boue de perforation. Les essais de compression oedométrique effectués ont montré que le tassement et le gonflement de la lignite sont très variables. De toute façon, il a été possible de reconnaître l'existence d'une corrélation entre le charge de préconsolidation et le gonflement. Cette corrélation a permis d'évaluer la quantité d'eau que la lignite peut absorber de la boue de forage.