

VALTER MAGGI (\*)

## PROFILI DI DENSITÀ E MODELLI PROFONDITÀ/DENSITÀ SU CAROTE DI NEVATO PRELEVATE IN ALCUNI GHIACCIAI DELLA TERRA VITTORIA SETTENTRIONALE (ANTARTIDE)

**ABSTRACT:** VALTER MAGGI, *Depth/density profiles and models from Northern Victoria Land shallow firn-cores (Antarctica)*. (IT ISS 0391-9838, 1995).

During the 91-92, 92-93, 93-94 and 94-95 field seasons carried out by the Italian Antarctic Program (PNRA) 11 sites have been investigated to evaluate the annual accumulation rate in the Northern Victoria Land. Fourteen shallow firn cores, 7,5 m to 21 m depth, have been drilled in different accumulation situations from the coast to the East Antarctic plateau margin, through the Transantarctic Mts. Density profiles have been performed directly in the field and simple models have been calculated to evaluate the density gradients with depth. In this work we apply a simple depth/density model at 4 cores from different geographical situations. The upper 7 m of profiles are the same for all the curves (with a gradient of  $0,22 \text{ g cm}^{-3} \text{ m}^{-1}$ ), but from 7 m depth downward these cores are grouped into two different density gradients. In the bottom core of the Hercules Névé (-20,5 m) the maximum density ranges from  $0,58$  to  $0,60 \text{ g cm}^{-3}$  and in the Priestley Glacier (-12 m) the maximum density is  $0,54 \text{ g cm}^{-3}$ , both showing a gradient of  $0,008 \text{ g cm}^{-3} \text{ m}^{-1}$ . In other 2 cores, Styx Gl. (-12 m) and Pilot Gl. (-11,9 m), the density profiles show a gradient of  $0,016 \text{ g cm}^{-3} \text{ m}^{-1}$  with values ranging from  $0,60$  to  $0,64 \text{ g cm}^{-3}$ . The density gradient of the upper part of the cores are dominated by *grain packing*, where load pressure increases the density up to  $0,5 \text{ g cm}^{-3}$  ( $0,55$  is the maximum theoretical density for *packing* process). For the second deeper part of the profiles, *sintering* processes have been involved for the increase of density. In this situation, the temperature of the ice crystals is an important factor in grain-to-grain matter transfer. For the future drilling activities, a simple depth-density model has been applied to these 4 firn cores, to try to define the close-off depth.

**KEY WORDS:** Shallow drill, Firn, Glacier ice, Depth/density modeling, Northern Victoria Land, (Antarctica).

**RIASSUNTO:** VALTER MAGGI, *Profili di densità e modelli profondità/densità su carote di nevato prelevate in alcuni ghiacciai della Terra Vittoria Settentrionale (Antartide)*. (IT ISS 0391-9838, 1995).

Durante le spedizioni 91-92, 92-93, 93-94 e 94-95 del Programma Nazionale Ricerche in Antartide (PNRA) sono stati studiati 11 ghiacciai della Terra Vittoria Settentrionale con l'intenzione di valutare l'accumulo medio annuo in questo settore dell'Antartide. Sono state effettuate 14 perforazioni superficiali, a carotaggio continuo, con profondità comprese tra 7,5 e 21 m. I siti di questi sondaggi sono stati scelti in differenti situazioni di accumulo a partire dalla costa fino al margine del plateau, attraverso le Montagne Transantarctiche. Durante le perforazioni sono stati misurati i valori di densità del nevato, in modo da ottenere i profili di variazione di questo parametro ed il suo gradiente con la profondità, direttamente sui siti di perforazione. In questo lavoro sono stati presi in considerazione i profili di densità di quattro carotaggi scelti in differenti situazioni ambientali. I primi 7 m di tutti i profili analizzati presentano un gradiente molto simile, intorno ai  $0,22 \text{ g cm}^{-3} \text{ m}^{-1}$ , ma a partire da questa profondità si osserva che i profili hanno due gradienti differenti. Hercules Névé e Priestley Glacier mostrano un gradiente di circa  $0,008 \text{ g cm}^{-3} \text{ m}^{-1}$ , valore circa doppio di quello che mostrano i profili dello Styx Glacier e del Pilot Glacier con  $0,016 \text{ g cm}^{-3} \text{ m}^{-1}$ . La prima parte dei profili, simile per tutte le curve può essere ricondotta all'impaccamento meccanico dei cristalli di ghiaccio (*grain packing*) che caratterizza la parte superficiale della diagenesi del nevato (massima densità  $0,55 \text{ g cm}^{-3}$ ). Nella parte profonda dei profili i processi che intervengono sono quelli di sublimazione e ricristallizzazione (*sintering*), dove intervengono come fattori dominanti nella diagenesi del nevato i parametri ambientali ed in particolare la temperatura media annua del sito (temperatura misurabile a -10 m di profondità, dove si annulla l'escursione termica annua). Questi quattro profili di densità sono stati utilizzati come punti di partenza per l'applicazione di un'equazione profondità/densità con l'intento di ottenere informazioni sulla possibile profondità di passaggio nevato-ghiaccio (*close-off*) in modo da programmare ulteriori perforazioni a maggiori profondità (100-150m).

**TERMINI CHIAVE:** Perforazioni superficiali, Nevato, Ghiaccio di ghiaccio, Modelli profondità/densità, Terra Vittoria Settentrionale (Antartide).

### INTRODUZIONE

Durante quattro spedizioni antartiche (VII, VIII, IX, X) organizzate dal Programma Nazionale di Ricerche in Antartide (PNRA), a partire dall'estate australe 1991-92 fino a quella 1994-95, sono state effettuate oltre 20 perforazioni superficiali nei principali ghiacciai e nevè della Terra Vittoria Settentrionale (fig. 1). Questa attività è inserita in un più ampio progetto che intende studiare l'accumulo medio annuo di quel settore dell'Antartide, al fine di fornire informazioni

(\*) Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio, Via Emanuele li, 15, 20126 Milano - Italia.

Comunicazione presentata al Convegno «Cento anni di ricerca glaciologica in Italia», Torino, 19-20 Ottobre 1995 (Communication presented at the meeting «100 years of glaciological research in Italy», Turin, 19-20 October 1995).

Questo lavoro è stato effettuato all'interno del Progetto 2a Glaciologia e Paleoclima del Programma Nazionale di Ricerche in Antartide, finanziato dall'ENEA mediante accordi di collaborazione con l'Università degli Studi di Milano, e tutte le Unità Operative che partecipano a questo lavoro. Si deve inoltre ringraziare il personale logistico della VII, VIII, IX e X spedizione, per l'essenziale aiuto durante l'esecuzione delle perforazioni.

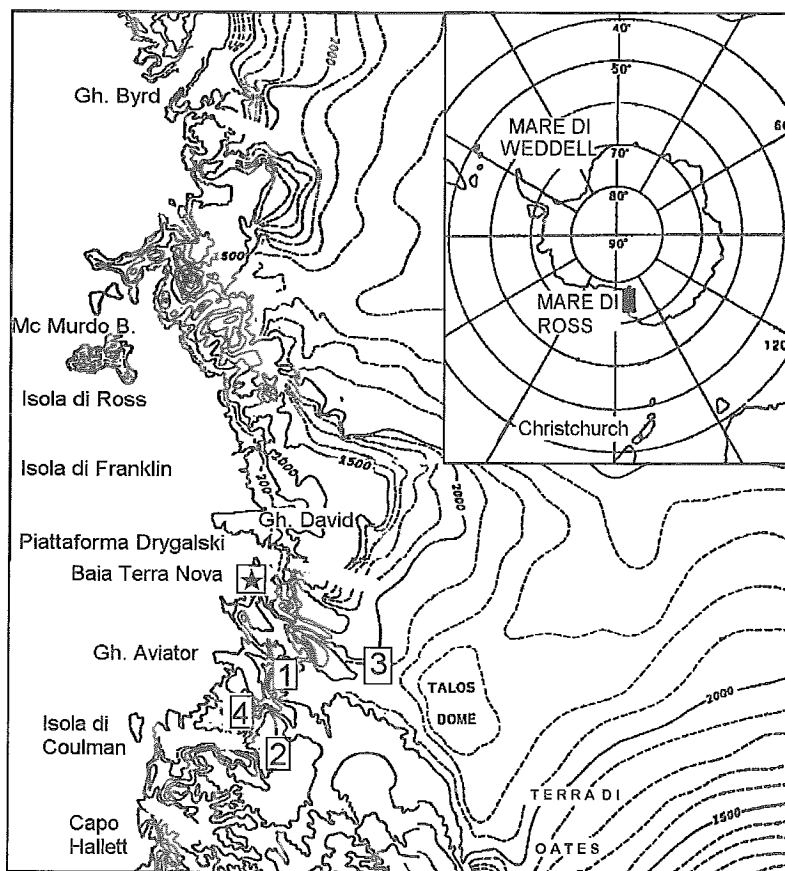


FIG. 1 - Mappa schematica della Terra Vittoria Settentrionale con l'ubicazione delle perforazioni effettuate durante le spedizioni dal 1991 al 1995. 1) Styx Gl.; 2) Hercules N.; 3) Priestley Gl.; 4) Pilot Gl. La stella indica la posizione della Stazione di Baia Terra Nova.

FIG. 1 - Sketch map of Northern Victoria Land with the 1991-1995 drill sites. The star indicate the Italian Antarctic station Terra Nova Bay.

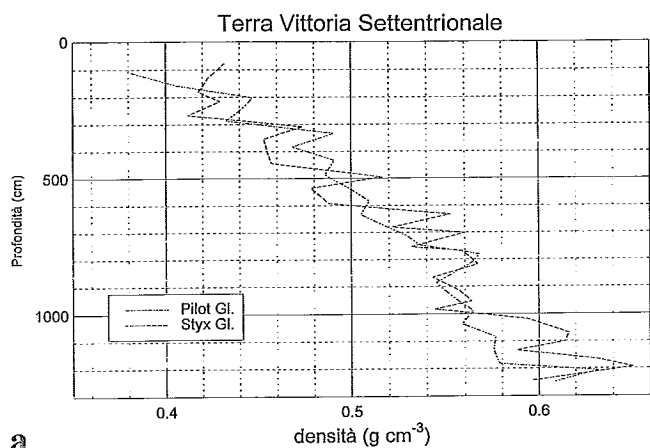
per la misura del bilancio di massa dei ghiacciai dell'area e la caratterizzazione climatica della Terra Vittoria Settentrionale. Tutti i siti perforati sono stati scelti allo scopo di ottenere il massimo numero di dati sulle caratteristiche chimiche, fisiche ed isotopiche del nevato. Questo lavoro ha fornito le prime informazioni sui caratteri climatici ed ambientali degli ultimi 25-30 anni (BARBOLANI & *alii*, 1993) del settore costiero della Terra Vittoria Settentrionale.

L'attività di perforazione svolta fino ad ora è stata effettuata con carotieri portatili, in vetroresina ed alluminio, che permettevano di raggiungere i 20-30 m di profondità con un supporto logistico minimo (massimo 2 giorni di lavoro). L'acquisizione di un nuovo sistema di perforazione, che permette di effettuare carotaggi continui fino a 150 m di profondità, ha richiesto il cambiamento di buona parte delle strategie di lavoro di campagna. Le aumentate difficoltà logistiche, dovute non solo all'aumento del peso dell'attrezzatura (400 kg per la sonda solamente) ed all'allungarsi dei tempi di lavoro (dai 4 ai 10 giorni), ma anche dall'incremento del volume di carote recuperabili (oltre 800 kg di carote per 150 m), obbliga all'organizzazione ed alla costruzione di un campo remoto permanente di alcuni giorni. Queste nuova visione del lavoro di campagna obbliga ad effettuare una programmazione più profonda delle perforazioni, partendo dai siti già conosciuti, e cercando di

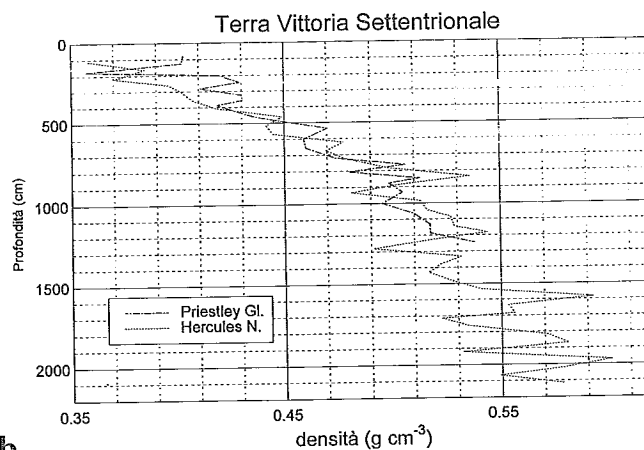
sfruttare al massimo le informazioni ottenute dalle precedenti perforazioni più superficiali. Uno dei parametri essenziali per ottenere informazioni sui ghiacciai è la densità del nevato, o meglio, la sua variazione con la profondità.

Lo studio dei profili di densità ha permesso, sin dagli anni 50, di migliorare le conoscenze sui processi che avvengono nella parte superficiale dei ghiacciai, a partire dall'accumularsi della neve fino al momento della chiusura dei pori con la formazione delle bolle d'aria (*close-off*). I tempi ed i modi con cui si manifesta la diagenesi del nevato e la sua trasformazione in ghiaccio e la profondità alla quale avviene questa transizione cambiano di ghiacciaio in ghiacciaio. La variazione della densità con la profondità è influenzata, tra l'altro, dai parametri fisici come la temperatura a cui si forma la neve, la temperatura alla superficie del ghiacciaio e dalla presenza o meno di acqua (PATERSON, 1994). Naturalmente le differenze maggiori si osservano tra ghiacciai ubicati in condizioni climatiche differenti. L'esempio più classico è la differenza che esiste tra i ghiacciai delle aree polari e quelli delle aree temperate, diversi non solo nei processi diagenetici del nevato. In presenza d'acqua, come per quasi tutti i ghiacciai delle nostre latitudini (ghiacciai temperati), questi processi sono prossimi alla superficie e possono avvenire a pochi metri di profondità (PATERSON, 1994).

Queste differenze possono venire osservate anche all'in-



a



b

Fig. 2 - Profili di densità delle quattro perforazioni superficiali usate in questo lavoro. a) Pilot Gl. e Styx Gl.; b) Priestley Gl. e Hercules N.

Fig. 2 - Density profiles of the shallow cores discussed in this work.

TABELLA 1 - Elenco dei caratteri geografici e di alcuni parametri fisici dei siti oggetto di questo lavoro. I parametri  $r_0$  e L sono descritti nel testo. (\*) Temperatura calcolata a partire dai valori degli isotopi stabili dell'ossigeno (Barbara Stenni com. pers.). (\*\*) Accumulo medio anno a partire da dati glaciochimici ottenuti in una trincea prossima alla perforazione (Roberto UDIŠTI com. pers.).

TABLE 1 - Main parameter of the sites discussed in this work. The significance of  $r_0$  and L are discussed in the text. (\*) Temperature obtained from stable isotope measurements (Barbara Stenni per. comm.). (\*\*) Accumulation obtained from chemical pit samples measurements (Roberto UDIŠTI pers. comm.).

Sito	quota (m)	km dalla costa	temperatura -10m (°C)	accumulo (mm w.e.)	profondità (m)	$\rho_0$	$\lambda$	L
Styx Gl.	1800	70	-29,0*	180	12	0,40	0,031	32
Pilot Gl.	2200	75	-29,1	250**	11,9	0,38	0,035	25
Priestley Gl.	2200	200	-33,0	130	12	0,37	0,024	38
Hercules N.	2960	100	-33,1	150	21,5	0,35	0,022	40

terno delle stesse aree polari (artiche ed antartiche), dove si osservano sensibili variazioni nei caratteri fisici tra differenti aree (PATERSON, 1994; tab. 2). Nelle zone interne delle calotte Antartiche o della Groenlandia, il passaggio nevato-ghiaccio si trova normalmente a profondità superiori a 70 m, nelle aree costiere invece l'occlusione dei pori può avvenire a profondità inferiori (50-60 m).

## PROCESSI DI DENSIFICAZIONE IN AREE POLARI

Per quanto esistano ancora delle difficoltà nella comprensione dei processi che portano alla diagenesi della neve in nevato e del passaggio tra il nevato ed il ghiaccio nelle aree temperate, lo studio dei ghiacciai polari, ed in particolare di quelli posti nella zona di neve secca (*snow dry zone*), ha fornito un schema evolutivo molto preciso dei cambiamenti fisici nella parte superficiale dei ghiacciai dove i processi avvengono in assenza di acqua e con una limitata umidità (ALLEY 1988; PATERSON, 1994).

*Impaccamento (Packing)*. La parte più superficiale del nevato è interessata da questo processo, che avviene quando i singoli cristalli di ghiaccio (densità di circa  $0,917 \text{ g cm}^{-3}$ ) tendono a sistemarsi tra loro in modo da occupare il minor spazio possibile (impaccamento). Questo processo è

aiutato dal fatto che i cristalli di neve con forme più complesse, subito dopo la loro caduta, iniziano a trasformarsi in grani, che presentano forme a minore energia libera (classicamente la sfera). L'impaccamento permette al nevato di raggiungere valori di densità di  $0,55 \text{ g cm}^{-3}$  ed una porosità compresa tra il 26 ed il 40%. Questo valore di  $0,55 \text{ g cm}^{-3}$  è naturalmente un valore teorico, che però non si discosta di molto dai valori misurati.

*Sinterizzazione (Sintering)*. L'impaccamento non è il risultato finale del processo diagenetico, ma da un certo punto in poi cominciano processi di trasferimento di materia tra i cristalli, con la formazione di grani. È stato osservato sperimentalmente (PATERSON, 1994) che, intorno alla massima densità di *packing* (con ancora un'alta porosità), il ghiaccio possiede un'alta pressione di vapore ed i processi dominanti sono quelli legati alla sublimazione. Con l'aumento della densità e la diminuzione della porosità anche la sublimazione passa in secondo piano. I processi che intervengono, prevalentemente legati al continuo aumento di peso del manto nevoso (continuo accumulo) e all'aumentata superficie di contatto tra i cristalli, sono la ricristallizzazione e le deformazioni tra i grani. Si osserva non solo un cambiamento nella forma dei cristalli, ma anche un cambiamento nella dimensione degli stessi, nel tentativo di raggiungere condizioni energeticamente più stabili. Questo processo porta alla fine alla chiusura definitiva dei pori ed

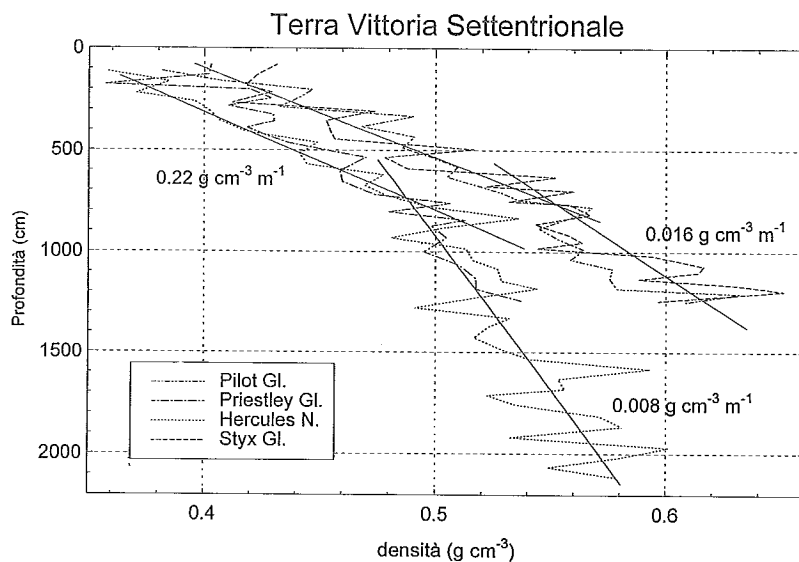


Fig. 3 - Rappresentazione di tutti i profili di densità, con i valori dei gradienti di densità calcolati per le due coppie di perforazioni. Sotto i 7 m di profondità si osserva la netta differenza di gradiente tra le due coppie di profili.

FIG. 3 - Density profiles with the gradients observed. It is possible to observe the gradient differences below 7 m depth.

alla formazione delle bolle d'aria, il passaggio nevato-ghiaccio (PATERSON, 1994; ALLEY & *alii*, 1986). È evidente che questo passaggio, che avviene ad un valore intorno a  $0,85 \text{ g cm}^{-3}$ , è essenziale non solo da un punto di vista glaciologico, ma rappresenta, per chi effettua le perforazioni in ghiacciai, un'importante passaggio da un punto di vista delle caratteristiche meccaniche del ghiaccio.

**Compressione delle bolle.** Ulteriori aumenti della densità, anche se i processi di deformazione e di ricristallizzazione sono ancora presenti, avvengono prevalentemente per compressione dell'aria contenuta nelle bolle d'aria, fino a densità di circa  $0,92 \text{ g cm}^{-3}$  (PATERSON, 1994).

L'uso di complessi modelli di densificazione (BENSON, 1962; BARNOLA & *alii*, 1991) ha permesso di investigare a fondo quelli che sono i comportamenti fisici dei primi 100-120 m di nevato e di ghiaccio, nei ghiacciai delle aree polari. Naturalmente, quando si intende restituire in termini matematici una serie di processi naturali, si rende necessario utilizzare un numero elevato di variabili che portano inevitabilmente a predisporre modelli estremamente complessi. Quando invece si vuole effettuare la previsione di andamento di un solo parametro, all'interno di un semplice gruppo di condizioni costanti, ci si può rivolgere a modelli semplificati che, pur con una minore precisione, possono portare a risultati accettabili. Nel caso qui riportato l'interesse per la soluzione di un problema pratico, legato alla necessità di prevedere la profondità alla quale il nevato si trasforma in ghiaccio di alcuni ghiacciai scelti per delle perforazioni, ha permesso l'uso di un modello matematico che, come vedremo, partendo da semplici condizioni al contorno si è rivelato di estrema utilità in problemi di questo tipo.

## PROFILI DI DENSITÀ

La misura di densità delle varie carote è stata effettuata direttamente in Antartide per eliminare i problemi dovuti

al loro trasporto (dall'Antartide all'Italia) ed alla loro conservazione. La misura della densità delle carote, effettuata durante l'esecuzione del sondaggio, fornisce informazioni sulle caratteristiche fisiche dei ghiacciai perforati e sul nevato che ne compone la parte superficiale. L'esecuzione di queste misure, direttamente sul ghiacciaio, permette inoltre di dare preziose informazioni per il proseguimento del sondaggio stesso.

Il sito sullo Styx Glacier si trova a 1800 m di quota ed a circa 70 km dalla costa; è stato perforato nel 1993-94 (12,5 m) e si tratta del sito più costiero e a quota minore di quelli presi in considerazione (tab. 1). Lo studio di una perforazione precedente nel medesimo sito ha fornito un record isotopico e chimico di oltre 30 anni (BARBOLANI & *alii*, 1993) e un valore di accumulo medio annuo di  $250 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ . Non è stata misurata la temperatura a -10 m, dove lo smorzamento dell'onda termica stagionale fornisce indicazioni sulla temperatura media annua del sito (PATERSON, 1994), ma i bassi valori nei rapporti degli isotopi stabili dell'ossigeno e dell'idrogeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ) indicano condizioni termiche paragonabili a siti posti a quota maggiore o più lontani dalla costa (Stenni, com. personale). Il valore superficiale di densità è abbastanza elevato (circa  $0,42 \text{ g cm}^{-3}$ ) e raggiunge, nella parte più profonda (12,5 m), i  $0,62 \text{ g cm}^{-3}$  (fig. 2a). Il sito sul Pilot Glacier, posto a 2200 m, si trova ad una distanza dalla costa di circa 75 km e presenta un profilo di densità simile allo Styx Gl. (fig. 2a) ed una densità del nevato superficiale di circa  $0,38 \text{ g cm}^{-3}$ . Anche i profili di densità dell'Hercules Névé (-20,5 m), posto a 2960 m di quota ed a 100 km all'interno, e del Priestley Glacier (-12 m), posto a 2200 m di quota ed a 200 km dalla costa, presentano un'evidente sovrapposizione (tab. 1 e fig. 2b). In questo caso le densità superficiali del nevato non superano, per entrambi i siti, i  $0,4 \text{ g cm}^{-3}$  e raggiungono, a fondo foro, i  $0,54 \text{ g cm}^{-3}$  per il Priestley Gl. e i  $0,60 \text{ g cm}^{-3}$  per l'Hercules N.

Sovrapponendo i quattro i profili di densità (fig. 3) si osservano delle sostanziali differenze nell'andamento della

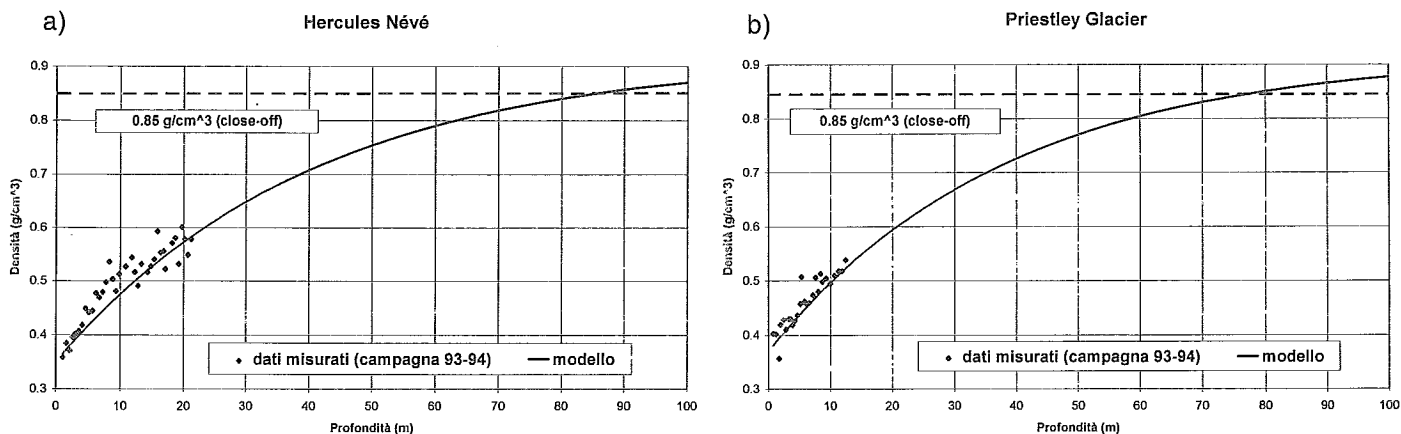


FIG. 4 - Dati di densità, modelli calcolati e profondità del passaggio nevato-ghiaccio, ottenibile dall'applicazione dell'equazione (4) ai due siti dell'Hercules N. (a) e del Priestley Gl. (b). I rombi rappresentano i dati misurati, la linea continua l'andamento della densità ottenuto dal modello, la linea tratteggiata rappresenta gli  $0,85 \text{ g cm}^{-3}$ . L'intersezione di modello con la linea tratteggiata rappresenta la profondità del passaggio nevato-ghiaccio (close-off).

FIG. 4 - Density profiles (dots), density models (continuous line) and  $0,85 \text{ g cm}^{-3}$  close-off density limit (shared line) from the Hercules N. firn-core (a) and Priestley Gl. firn core (b).

densità specialmente nella parte compresa tra i 7 m e il fondo foro. I primi 7 m hanno un andamento parallelo, con la coppia Styx-Pilot spostata verso densità maggiori rispetto alla coppia Hercules-Priestley. In questo primo tratto il gradiente di densità presenta un valore di  $0,22 \text{ g cm}^{-3} \text{ m}^{-1}$ , che sembra caratterizzare non solo questi quattro siti, ma anche tutti quelli fino ad ora perforati (MAGGI & *alii*, 1994). Le differenze cominciano ad osservarsi nella parte più profonda dei profili. La coppia Styx-Pilot mostra un gradiente di  $0,016 \text{ g cm}^{-3} \text{ m}^{-1}$ , doppio rispetto alla coppia Hercules-Priestley, che presenta un gradiente di  $0,008 \text{ g cm}^{-3} \text{ m}^{-1}$ . Come già espresso nei capitoli precedenti, in questa parte più profonda i processi dominanti sono quelli di sinterizzazione, nei quali le caratteristiche fisiche e termiche del nevato diventano estremamente importanti per i processi di densificazione.

## MODELLI DI DENSITÀ

Qui di seguito riportiamo la trattazione proposta da LING (1985), in parte integrata con dati proposti da PATERSON (1994), che ha permesso di semplificare l'approccio alla modellazione dei profili di densità. La variazione della densità  $d\rho$  con la profondità è legata sia alla variazione della pressione  $dp$  che alla differenza tra la densità massima raggiungibile dal ghiaccio nella zona di neve secca (*dry snow zone*) ( $\rho_m$ ) e la densità ( $\rho$ ) ad una certa profondità (HERRON & LANGWAY, 1980) dalla relazione:

$$d\rho = c(\rho_m - \rho) dp \quad (1)$$

dove  $c$  è una costante ed il cambiamento di pressione è:

$$dp = \rho g dz \quad (2)$$

dove  $z$  è la profondità dalla superficie (in metri), e  $g$  è l'accelerazione di gravità.

Generalizzando l'equazione (1) si ottiene che:

$$d(\rho^n) = c(\rho_m - \rho) dp \quad (3)$$

dove i parametri  $n$  e  $c$  sono determinati dal confronto con i dati di campagna. LING (1985) considera il parametro  $n$  proporzionale alla rigidità del nevato ed il parametro  $c$  come una costante di proporzionalità (costante di correzione della curva). Sul valore del numero  $n$  esiste un'ampia trattazione (ALLEY, 1988; ALLEY & *alii*, 1986) che può essere omessa in quanto rientra nella semplificazione proposta da LING (1985). Infatti, per modelli semplici a due dimensioni, come per questo lavoro, può venire utilizzato  $n = 2$  che permette, attraverso l'integrazione delle equazioni 2 e 3, di ottenere:

$$(\rho_m - \rho)/(\rho_m - \rho_0) = e^{-\lambda z}$$

dove  $\rho_0$  è la densità superficiale del nevato e  $\lambda$  è una costante legata al sito. Già SCHYTT (1958) nei suoi primi lavori sulla variazione della densità del nevato aveva calcolato  $\lambda$  per una serie di siti, osservando che esisteva una relazione diretta tra questo parametro e la profondità del passaggio nevato-ghiaccio. La relazione che propose, per siti con densità superficiale compresa tra  $0,3$  e  $0,4 \text{ g cm}^{-3}$ , fu di  $\lambda = 1,9/z_t$  dove  $z_t$  è la profondità di transizione nevato-ghiaccio.

Partendo da questi presupposti e considerando la variabile  $\lambda = 1/L$ , dove  $L$  è un parametro anch'esso legato al sito (tab. 1), è possibile trasformare l'equazione sopra scritta come:

$$(\rho_m - \rho)/(\rho_m - \rho_0) = e^{-(z/L)}$$

oppure:

$$(\rho - \rho_0)/(\rho_m - \rho_0) = 1 - e^{-(z/L)} \quad (4)$$

Questa equazione permette di ottenere profili di variazione della densità con la profondità in siti posti in aree polari e, come si vedrà più avanti, di calcolare la densità al passaggio nevato-ghiaccio in siti dove, attraverso perforazioni superficiali, si ha a disposizione record di densità dei primi metri.

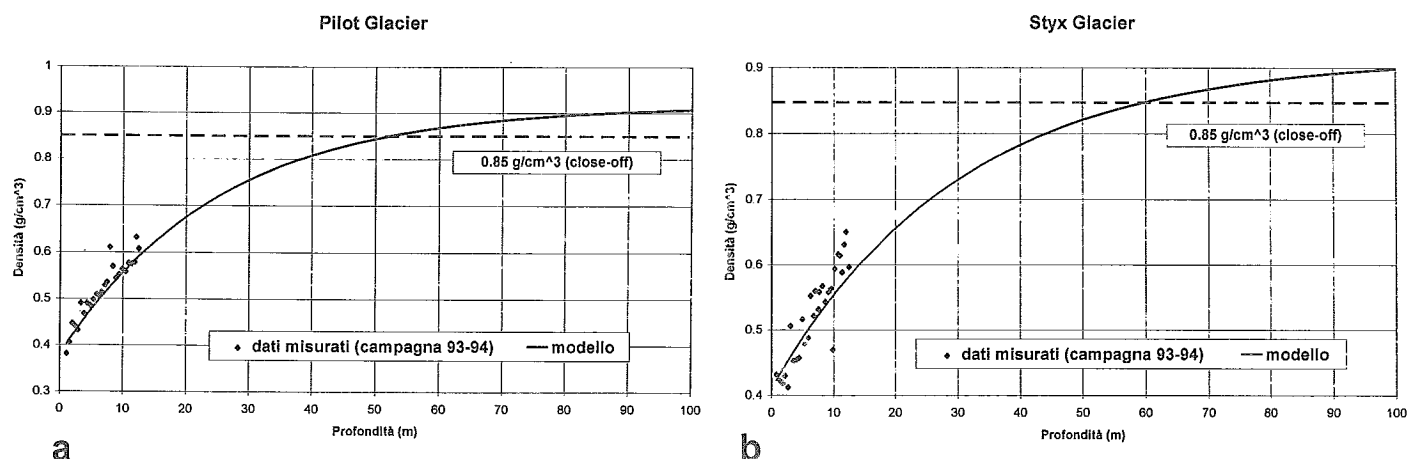


FIG. 5 - Dati di densità, modelli calcolati e profondità del passaggio nevato-ghiaccio, ottenibile dall'applicazione dell'equazione (4) ai due siti del Pilot Gl. (a) e dello Styx Gl. (b). I rombi rappresentano i dati misurati, la linea continua l'andamento della densità ottenuto dal modello, la linea tratteggiata rappresenta gli  $0,85 \text{ g cm}^{-3}$ . L'intersezione di modello con la linea tratteggiata rappresenta la profondità del passaggio nevato-ghiaccio (close-off).

Fig. 5 - Density profiles (dots), density models (continuous line) and  $0,85 \text{ g cm}^{-3}$  close-off density limit (shared line) from the Pilot Gl. firn-core (a) and Styx Gl. firn core (b).

TABELLA 2 - Elenco di alcuni siti polari di cui si conoscono i parametri di accumulo medio annuo, temperatura a -10 m e profondità di close-off.

TABLE 2 - List of the main parameters of same site drilled in cold and polar areas.

Stazione	accumulo ( $\text{kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )	temperatura a -10 m ( $^{\circ}\text{C}$ )	passaggio nevato-ghiaccio (m s.s.g.)	età (anni)	riferimento bibliografico
<i>Groenlandia</i>					
1 Site A	265	-30	75-80	185	Alley & Koci, 1988
2 Site 2	410	-25	66	120	Langway, 1967
3 Camp Century	320	-24	68	125	Gow, 1971
4 Milcent	495	-22	66-70	95	Paterson, 1994
5 Dye 3	495	-22	65-70	100	Paterson, 1994
<i>Antartide orientale</i>					
6 Vostok	22	-57	95	2500	Barnola & alii, 1987
7 Dome C	36	-54	100	1700	Raynaud & alii, 1979
8 South Pole	70	-51	115	1020	Kuivinen & alii, 1982
<i>Antartide occidentale</i>					
9 Byrd	140	-28	64	280	Gow, 1968
10 Little America	220	-24	51	150	Gow, 1968
11 Siple	500	-24	70	95	Schwander & Stauffer, 1984
<i>Canada Artico</i>					
12 Devon ice Cap	220	-23	62	210	Paterson, 1994
13 Agassiz Ice Cap	165	-25	53	235	Paterson, 1994

## CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Nelle figure 4a, 4b, 5a e 5b sono rappresentati i modelli di densità, ricavati dall'equazione (4), fino al passaggio nevato-ghiaccio, e confrontati con le misure in situ. La differenza tra le coppie di profili proposte nei capitoli precedenti è qui meglio apprezzabile, specialmente in termini di profondità del passaggio nevato-ghiaccio. Pur essendo l'equazione (4) la medesima per tutte le perforazioni, le condizioni di contorno, qui rappresentate della densità superficiale della neve e dalla costante L, portano ad ottenere andamenti di densità ben diversi. I siti qui descritti sono stati presi in considerazione per la loro potenziale capacità

di trovarsi in condizioni il più vicine possibile a quelle teoriche di densificazione, che caratterizzano le aree interne e più fredde del plateau antartico.

Le curve di densità teorica, tracciate dall'equazione (4) per l'Hercules Nève e per il Priestley Glacier, danno una profondità del passaggio nevato-ghiaccio compresa tra gli 80 ed i 90 m. Confrontando questi dati con la tabella 2, dove sono raccolti alcuni dati di transizione nevato-ghiaccio reperibili in bibliografia, si osserva che le loro profondità del passaggio nevato-ghiaccio si trovano in posizione intermedia tra i siti della parte interna dell'Antartide occidentale (Byrd e Siple) e della Groenlandia (Site A, Site 2, Camp Century, Milcent, Dye 3) ed i siti più interni del-

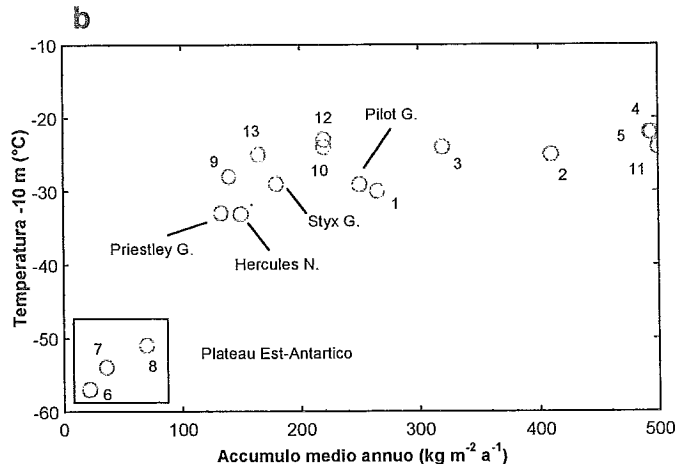
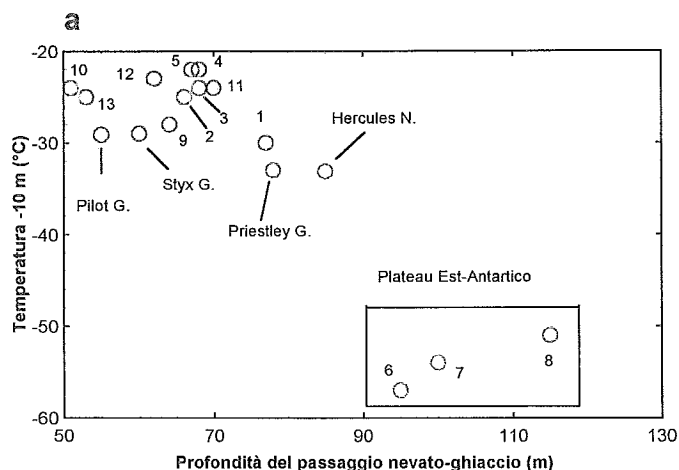


Fig. 6 - Grafici che rappresentano i rapporti esistenti tra le temperatura a -10m rispetto la profondità di close-off (a) e l'accumulo medio annuo (b) dei siti citati in questo lavoro e di quelli elencati in tab. 2.

Fig. 6 - Graph with -10 m depth temperature versus close-off depth (a) and annual mean accumulation (b) of the data from this work and data from table 2.

l'Antartide orientale (Vostok, Dome C e South Pole). Le differenze si possono osservare riportando i dati di temperatura a -10 m rispetto la profondità del passaggio nevato-ghiaccio (fig. 6a) e rispetto l'accumulo medio annuo (fig. 6b). Anche in questo caso si osserva che i siti dell'Hercules N e del Priestley Gl. sono spostati verso posizioni più polari, rispetto ai siti Styx Gl. e Pilot Gl.

Lo Styx Gl. ed il Pilot Gl. presentano delle profondità del passaggio nevato-ghiaccio minori, in confronto ai precedenti due siti, con valori rispettivamente di 60 e 52 m di profondità (fig. 5a e 5b). Nella figura 6a si osserva come lo Styx Gl. si colloca, insieme al Pilot Gl., in un gruppo che raccoglie ghiacciai di diversa ubicazione geografica, con una profondità del passaggio nevato-ghiaccio compresa tra i 50 ed i 70 m (Devon Ice Cap, Little America, Site A e altri; tab. 2). Per quanto riguarda il rapporto con l'accumulo annuo (fig. 6b), pur osservando una maggiore dispersione dei vari siti (tra 150 e 500 kg m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>), il Pilot Gl. e lo Styx Gl. non si discostano di molto tra loro.

Le differenze in gradiente, tra la prima e la seconda metà delle carote, è riconducibile ai differenti processi, precedentemente descritti, che avvengono nella parte superficiale del nevato in aree polari. L'impaccamento dei cristalli di ghiaccio (*grain packing*, PATERSON, 1994) interessa la metà superiore dei profili (fig. 3) e l'andamento parallelo dei gradienti che si osserva (0,22 g cm<sup>-3</sup> m<sup>-1</sup>) indica quanto i processi di densificazione siano in parte svincolati dalle caratteristiche ambientali del sito. Solo i processi strettamente legati ai cristalli di ghiaccio, come l'arrotondamento, sono controllati anche da interazioni con l'atmosfera (es. sublimazione) che possono influenzare eventualmente il tempo in cui avvengono (PATERSON, 1994), parametro che non viene preso in considerazione in questo lavoro. È interessante osservare come tutti e quattro i profili mostrino il cambio di gradiente ad una densità compresa tra 0,5 e 0,55 g cm<sup>-3</sup>, che rappresenta i valori massimi raggiungibili dal processo di *grain packing* (PATERSON, 1994). Con la profondità, all'avvicinarsi del massimo impaccamento, diventano sempre più importanti i processi di trasferimento di materia (punti di contatto tra i grani) e

quelli di sublimazione (sulle superfici dei cristalli). Da qui in poi sono le condizioni fisiche ed ambientali del sito a condizionare i processi di densificazione e metamorfismo del nevato e che portano alle differenze osservate nei profili di densità misurati.

#### BIBLIOGRAFIA

- ALLEY R.B. (1988) - *Concerning the deposition and diagenesis of strata in polar firn*. Journ. Glaciol., 34(118), 283-290.
- ALLEY R.B. & KOCI B.R. (1988) - *Ice-core analysis at Site A, Greenland: preliminary results*. Ann. Glaciol., 11, 1-4.
- ALLEY R.B., PEREPEZKO J.H. & BENTLEY C.R. (1986) - *Grain growth in polar ice: II. Application*. Journ. Glaciol., 32(112), 425-433.
- BADER H. (1963) - *Theory of densification of dry snow on high polar glaciers, II*. in «Ice and snow; properties, processes and applications» Kingery W.D. ed., M.I.T., February 12-16 1962, Cambridge, Mass. M.I.T. Press: 351-376.
- BARBOLAMI E., FREZZOTTI M., LONGINELLI A., MAGGI V., PICCARDI G., STENNI B. & UDISTI R. (1993) - *Snow accumulation in Northern Victoria Land: preliminary data from shallow ice core*. In: V International Symposium on Antarctic Glaciology, Cambridge 5-10 Sept. 1993, Poster Session.
- BARNOLA J.-M., RAYNAUD D., KOROTKEVICH Y.S. & LORIUS C. (1987) - *Vostok ice core provides 160.000-year record of atmospheric CO<sub>2</sub>*. Nature, 329, 408-414.
- BARNOLA J.-M., PIMIENTA P., RAYNAUD D. & KOROTKEVITCH Y.S. (1991) - *CO<sub>2</sub> climate relationship as deduced from the Vostok ice core: a re-examination based on new measurements and on a re-evaluation of the air dating*. Tellus 43B, 83-90.
- BENSON C.S. (1962) - *Stratigraphic studies in the snow and firn of the Greenland Ice Sheet*. SIPRE. Res. Reports 70.
- GOW A.J. (1968) - *Deep core studies of the accumulation and densification of snow at Byrd Station and Little America V, Antarctica*. CRREL Res. Report, 197.
- GOW A.J. (1971) - *Depth-time-temperature relationships of ice crystal growth in polar glaciers*. CRREL Res. Report, 282.
- HERRON M.M. & LANGWAY C.C. (1980) - *Firn densification: an empirical model*. Journ. Glaciol. 25(93): 373-385.
- KUIVINEN K.G., KOCI B.R., HOLDSWORTH G.W. & GOW A.J. (1982) - *South Pole ice core drilling, 1981-1982*. U.S. Ant. Journ., 17(5), 89-91.
- LANGWAY C.C. (1967) - *Stratigraphic analysis of a deep ice core from Greenland*. CRREL Res. Report, 77.
- LING C.H. (1985). *A note on the density distribution of dry snow*. Journ. Glaciol. 31(108): 194-195.

- MAGGI V., BARBANTE C., LAJ P. & UDISTI R. (1994) - *Glaciological investigation in Northern Victoria Land: preliminary results*. Field Data Report, IX Italian Antarctic Expedition 1993-94, Terra Antarctica, Siena: 61-62.
- PATERSON W.S.B. (1994) - *Physics of glaciers*. III ed., Pergamon Press, New York, 450 pp.
- RAYNAUD D., DUVAL P., LEBEL B. & LORIUS C. (1979) - *Crystal size and total gas content of ice: two indicators of the climatic evolution of polar ice sheets*. In: Colloque International sur l'Evolution des Atmosphères Planétaires et Climatologie de la Terre, Nice, 1978. Centre National d'Etudes Spatiales, Toulouse, 83-94.
- SCHWANDER J. & STAUFFER B. (1984) - *Age difference between polar ice and the air trapped in its bubbles*. Nature, 311, 45-47.
- SCHYTT V. (1954). *Glaciology in Queen Maud Land: work of the Norwegian-British-Swedish Antarctic Expedition*. Geogr. Rev. 44: 70-87.