



AREA POLITICHE DEL TERRITORIO
Direzione LI.Pp. Edifici e Monumenti
Servizio Edifici e Monumenti

Restauro del chiostro minore del complesso di S. Agostino, per l'ampliamento delle funzioni dell'università degli studi di Bergamo

PROGETTO ESECUTIVO

RELAZIONE CENTRO "GINO BOZZA"

Bergamo settembre, 2017

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO
arch. Dario Mazza



CENTRO "GINO BOZZA" PER LO STUDIO DELLE CAUSE DI DEPERIMENTO E DEI METODI
DI CONSERVAZIONE DELLE OPERE D'ARTE - CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE



MILANO 02.12.1983

PROTOCOLLO n. 4108/GD

38232

AI COMUNE DI BERGAMO
3° Dipartimento
24100- B E R G A M O

all'attenzione Arch. CAPPETTI

In riferimento all'intervento di restauro sul Complesso
Monastico di S. Agostino in Bergamo per la preservazione del
degrado dell'arenaria, inviamo la relazione sulle nostre in-
dagini per individuare il trattamento consolidante e protat-
tivo più idoneo per l'arenaria stessa, come richiesto da Vs.
delibera del 21.2.1983. Seguirà la fattura, inviata diretta-
mente da Consiglio Nazionale delle Ricerche di Roma.

Distinti saluti.

Il Funzionario Delegato
(prof. Grazia Dessì)

25/12 UTEC 2
Fotocopia UTEC 3

- Ing. Terzi
- arch. di pp

[Handwritten signature]

CENTRO « GINO BOZZA » PER LO STUDIO DELLE CAUSE DI
DEPERIMENTO E DEI METODI DI CONSERVAZIONE DELLE
OPERE D'ARTE - CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE



CHIESA DI S. AGOSTINO IN BERGAMO:
PROVE DI CONSOLIDAMENTO E PROTEZIONE

R.P. 83/11/087

COMPILATO DA

A. Alessandrini

R. Peruzzi

R. Bugini

G. Dassù

IL DIRETTORE

Luigi A. Alessandrini

MILANO 7.11.1983.

CHIESA DI S. AGOSTINO IN BERGAMO:
PROVE DI CONSOLIDAMENTO E PROTEZIONE

Introduzione

Su richiesta della Soprintendenza per i Beni Ambientali ed Architettonici di Milano gli esperti del Centro "Gino Bozza" hanno eseguito un sopralluogo nella Chiesa di S. Agostino in Bergamo allo scopo di constatarne lo stato di conservazione ed hanno successivamente effettuato i prelievi dei campioni di pietra necessari all'esecuzione delle prove utili ad individuare il tipo di consolidante e protettivo più adatto.

I risultati delle prove sono qui di seguito descritti.

1. Identificazione mineralogico-petrografica

A seguito di un primo esame visivo della pietra impiegata nella costruzione della chiesa è stato possibile distinguere due varietà in base al colore: una grigia ed una gialla. Si è notato che le due differenti colorazioni sono presenti anche sul medesimo concio e che la linea di demarcazione è sempre molto netta anche se non trova corrispondenza con le discontinuità geologiche (stratificazioni, laminazioni, gradiazioni, livelli conglomeratici, ecc.). Si è dedotto quindi che la colorazione è di origine secondaria e non sinsedimentaria. Anche dal punto di vista della composizione mineralogica non sono state notate differenze fra le due varietà e quindi si ritiene che la colorazione non sia determinata dalla presenza di particolari minerali in forma cristallina, ma dovuta a fenomeni di diffusione nella massa.

Ad un esame macroscopico la pietra in esame può essere identificata come una delle cosiddette "pietre forti bergamasche" (arenarie) molto usate nelle costruzioni della città fin dai tempi più remoti.

L'esame microscopico ha confermato questa ipotesi e la pietra

può essere classificata come un'arenaria, ricca di frammenti di rocce, del tipo grovacca. In particolare si osserva:

- quarzo, in quantità superiore al 50%;
- frammenti di rocce, come filladi, micascisti, porfidi, in quantità superiore al 20%;
- selce
- feldspato;
- miche;
- clorite;
- frammenti di rocce sedimentarie, come calcari e dolomie.

Abbondante il cemento calcareo mentre è scarsa la matrice argillosa. Il quarzo si presenta in cristalli dalle dimensioni uniformi sempre spigolosi o poco arrotondati. I clasti formati da frammenti di rocce si presentano con i bordi piuttosto arrotondati. I grossi cristalli di calcite hanno origine clastica, così come i frammenti micritici.

Lo studio di sezioni provenienti dalle cave di Sarnico, in cui l'arenaria è scavata fin dal XV secolo, permette di attribuire la arenaria in esame a questa formazione geologica (Arenaria di Sarnico), ma non permette di stabilire con certezza se provenga direttamente da queste cave piuttosto che da quelle di Castegneta, vicine alla città. Per la determinazione della esatta provenienza di questa, sarebbero perciò necessari anche studi di carattere geochimico, che non sembrano in questa sede necessari.

L'arenaria di Sarnico fa parte di quel gruppo di formazioni cretache conosciute come "Flysch lombardo". Affiora in modo quasi continuo in quella fascia prealpina che va dall'Alta Brianza, a sud dei laghi di Pusiano e Annone, alla zona immediatamente a Nord di Bergamo fino alla sponda sud-occidentale del Lago d'Iseo (Sarnico). Viene riferita al Santoniano-Turoniano (Cretaceo superiore). Si tratta di arenarie grigie, grigio-verdastre, grigio azzurre,

massicce o grossolanamente gradate alla base e con sottili interstrati argillosi.

2. Stato di conservazione

La pietra proveniente dal monumento presenta diffusi fenomeni di scagliatura, fessurazione e polverizzazione. Analisi preliminari hanno inoltre rivelato una abbondante quantità di solfati, probabilmente attribuibili ad una corrosione del cemento calcareo. Si può quindi affermare che la pietra della chiesa è in uno stato di avanzato degrado.

3. Trattamenti di consolidamento/protezione

I trattamenti prescelti e le modalità di applicazione sono illustrati in tabelle 1-2.

I trattamenti sono stati effettuati su cubi di 3 cm di spigolo.

I campioni erano rappresentativi delle due varietà di pietre e dei diversi stati di conservazione, cioè:

S	=	arenaria	grigia	sana
D	=	"	"	degradata
GS	=	"	gialla	sana
GD	=	"	"	degradata

E' inoltre utile precisare le modalità di esecuzione del trattamento di consolidamento sui campioni.

I campioni per le prove di imbibizione e per le prove di resistenza utilizzati all'invecchiamento artificiale sono stati completamente rivestiti di cotone idrofilo e garza; le soluzioni consolidanti imbibivano prima questo tampone per risalita capillare, quindi i campioni stessi.

I campioni destinati invece alle prove di porosità sono stati trattati con consolidante su una sola faccia, sempre per tampone. In entrambi i casi, terminato il trattamento di impregnazione i campioni sono stati sfasciati e fatti asciugare per 24 ore a temperatura ambiente.

4. Prove di qualificazione

Le prove di qualificazione sono state effettuate su 3 provini per ogni tipo. Tabelle e diagrammi riportano i valori medi dei parametri misurati.

4.1. Aspetto estetico

Il trattamento 1 non modifica l'aspetto originale del materiale lapideo. Il trattamento 2 invece conferisce all'arenaria una tonalità più scura; ciò si verifica soprattutto con la varietà gialla. Il trattamento 3 tende anch'esso a rendere più scura l'arenaria, sia pure in misura molto lieve.

4.2. Assorbimento d'acqua per immersione totale

La prova è stata eseguita secondo la Raccomandazione NORMAL 7/81. In figura 1 è riportato l'andamento nel tempo della quantità d'acqua assorbita, mentre in tabella 3 sono riportati i valori delle capacità di imbibizione. Dai dati si desume quanto segue:

Gruppo S: per le prime 8 ore i tre trattamenti sperimentati si comportano in modo analogo riducendo drasticamente l'assorbimento di acqua caratteristico della pietra. Dopo 48 ore, mentre i trattamenti 1 e 3 continuano a mantenere ridotto l'assorbimento d'acqua, il trattamento 2 induce un assorbimento di acqua analogo a quello del materiale non trattato;

Gruppo D: nelle prime 8 ore i trattamenti 1 e 3 riducono, in modo assai simile, l'assorbimento d'acqua, mentre i campioni sottoposti al trattamento 2 hanno un comportamento simile ai campioni non trattati. Dopo 48 ore il trattamento 1 è quello che si dimostra più efficace nel ridurre l'assorbimento d'acqua, seguito, in ordine di merito, dal trattamento 3;

Gruppo GS: i tre trattamenti sperimentati riducono sensibilmente, anche dopo 240 ore, l'assorbimento d'acqua;

Gruppo GD: i risultati ottenuti non sono significativi a causa dell'estrema differenza nello stato di conservazione dei campioni considerati.

Considerando complessivamente i quattro gruppi di arenaria, i trattamenti 1 e 3 presentano le migliori caratteristiche.

4.3. Evaporazione -----

La prova è stata eseguita immediatamente dopo quella di assorbimento d'acqua e sugli stessi provini. Questi, tenuti in ambiente a temperatura e umidità costante ($T = 20^{\circ}\text{C}$, $UR = 40\%$), sono stati pesati ad intervalli prefissati di tempo. In figura 2 è riportato l'andamento nel tempo del contenuto residuo d'acqua. Si nota:

Gruppo S: tutti i trattamenti rallentano l'evaporazione. Migliore è il trattamento 3 che dopo 4 giorni porta alla completa eliminazione d'acqua;

Gruppo D: tutti i trattamenti rallentano l'evaporazione e sono quasi equivalenti. Anche in questo caso il trattamento 3 sembra il migliore;

Gruppo GS: i trattamenti sono quasi equivalenti. Il trattamento 3 sembra il migliore;

Gruppo GD: la prova non è risultata significativa per quanto detto a proposito dell'assorbimento d'acqua.

Complessivamente il trattamento 3 è risultato il migliore.

4.4. Porosità e distribuzione del volume dei pori in funzione del loro diametro

Le misure sono state eseguite con porosimetro a mercurio secondo la Raccomandazione NORMAL 4/80.

Le misure sul materiale degradato non trattato sono state effettuate su uno strato superficiale (1 cm di spessore), mentre le misure sul materiale trattato, sia sano che degradato, oltre che sullo strato superficiale, sono state effettuate su un altro strato alla profondità di 3 cm dalla superficie esterna. I valori sono riportati in tabella 4 e sono la media di tre misure per strato.

Dall'esame delle tabelle si deduce quanto segue:

Gruppo S: il trattamento 1 penetra nello strato interno modificandone la struttura; il trattamento 2 non penetra in profondità; l'apparente aumento di porosità nel I strato è probabilmente dovuto al protettivo che forma uno strato superficiale non sempre aderente al materiale sottostante. Il trattamento 3 penetra all'interno apportando però una minore modificazione strutturale. I trattamenti 1 e 3 risultano quindi i più efficaci.

Gruppo D: il trattamento 1 penetra all'interno del materiale modificando sensibilmente la struttura e diminuendo drasticamente la porosità. Il trattamento 2 penetra all'interno modificando la struttura: il fenomeno è meno marcato di quanto riscontrato con il trattamento 1. Il trattamento 3 penetra all'interno, diminuendo la porosità e modificando fortemente la struttura. Tutti i trattamenti sperimentati, quindi, interessano l'interno del materiale; i trattamenti 1 e 3 sembrano apportare i migliori benefici;

Gruppo GS: la modificazione strutturale rilevata all'interno del materiale trattato con 1 fa pensare ad una penetrazione del consolidante, anche se la porosità totale non ha subito variazioni a causa

probabilmente, di un effetto di compensazione dovuto a variazione strutturale. Il trattamento 2 si comporta in modo assai simile al trattamento 1. Il trattamento 3 si comporta circa in modo analogo ai trattamenti 1 e 2, anche se la penetrazione all'interno sembra di minor entità per la minor variazione strutturale apportata. Nel complesso i trattamenti sperimentati sembrano equivalersi, il trattamento 3 sembra avere una minore penetrazione all'interno.

Gruppo GD: la notevole modificazione strutturale fa pensare che il trattamento 1 penetri all'interno del materiale, anche se non si nota una sensibile diminuzione di porosità per effetti di compensazione. Il trattamento 2 sembra penetrare all'interno anche se la penetrazione è accompagnata da una minore variazione strutturale di quanto riscontrato con il trattamento 1. Il trattamento 3 penetra all'interno modificando leggermente la struttura. I trattamenti 1 e 3 sembrano quindi i più affidabili.

Complessivamente i trattamenti 1 e 3 sembrano penetrare in profondità in misura maggiore del trattamento 2.

Le misure porosimetriche inoltre hanno rivelato che le due varietà di arenaria considerate hanno caratteristiche strutturali diverse. Si nota infatti che la varietà gialla ha una porosità bassa (circa la metà della grigia), rappresentata prevalentemente da pori piccoli, mentre nella varietà grigia sono presenti, grosso modo in egual misura, pori di tutte le dimensioni.

4.5. Resistenza alla cristallizzazione

I provini sono stati sottoposti a cicli di invecchiamento consistente in immersione totale in una soluzione satura di solfato di sodio per 7 ore seguita da evaporazione in stufa a 50°C per 16 ore e poi in aria per 1 ora. I provini venivano esaminati visivamente al termine di ogni ciclo, fino alla fine della prova (20 cicli).

Si è notato quanto riportato in tabella 5.

Informazioni più precise si sono dedotte dalle perdite in massa (tabella 6).

Dall'esame delle tabelle 5-6 si deduce quanto segue:

Gruppo S: il materiale, sia quello non trattato che quello trattato, presenta in generale una bassa resistenza alla cristallizzazione. Il trattamento 1 sembra apportare un lieve miglioramento;

Gruppo D: il trattamento 3 migliora lievemente la resistenza alla cristallizzazione;

Gruppo SS: nel complesso il materiale, anche quello non trattato, resiste alla cristallizzazione. Il trattamento 3 aumenta sensibilmente questa resistenza;

Gruppo GD: il trattamento 1 aumenta sensibilmente la resistenza alla cristallizzazione; con il trattamento 3 l'aumento di resistenza è meno marcato.

Complessivamente i trattamenti 1 e 3 conferiscono una migliore resistenza alla cristallizzazione, anche se la loro efficacia è risultata variabile nei vari gruppi di materiale considerato.

4.6. Resistenza alle radiazioni ultraviolette

I campioni sono stati posti in camera d'invecchiamento alla distanza di 25 cm da due lampade Philips HPK 125 W a 20°C e 50% di umidità relativa. La prova è stata protratta ininterrottamente per 280 ore quando il panno n.º 8 della scala di colore dei blu (UNI 7097/72, UNI 5137, UNI 5146) ha subito un viraggio indice 3 della scala dei grigi (ISO 105 A02). La valutazione del viraggio di colore dei campioni è stata effettuata confrontando la parte esposta con quella non esposta ed utilizzando la scala ISO 105 A03.

Al termine della prova si è notato che solo i campioni sottoposti al trattamento 2 subiscono variazione di colore (indice 3/4-2/3 rispetto all'indice 5 dei campioni non trattati).

4.7. Resistenza al gelo

La prova è stata effettuata in camera climatica sottoponendo i provini a cicli di gelo/disgelo. Ogni ciclo consisteva in:

- 1 ora a $+ 24^{\circ}\text{C}$, UR = 100%
- 1/2 ora da $+ 24^{\circ}\text{C}$ a $- 10^{\circ}\text{C}$
- 1 ora a $- 10^{\circ}\text{C}$
- 1/2 ora da $- 10^{\circ}\text{C}$ a $+ 24^{\circ}\text{C}$

I provini venivano esaminati visivamente a periodi prefissati, fino al termine della prova (63 cicli).

Si è notato quanto riportato in tabella 7. Informazioni più precise si sono dedotte dalle perdite in massa (tabella 8).

Dall'esame delle tabelle 7-8 si deduce quanto segue:

Gruppo S: il materiale, sia trattato che non trattato, resiste bene al gelo. I tre trattamenti migliorano la resistenza; in particolare il trattamento 3 sembra portare il maggior contributo.

Gruppo D: il materiale non trattato si degrada sensibilmente. I trattamenti sperimentati aumentano la resistenza al gelo; in particolare il trattamento 1, seguito dal trattamento 2, sembra apportare il maggior contributo;

Gruppo GS: il materiale, sia trattato che non trattato, resiste bene al gelo. I trattamenti migliorano la resistenza; in particolare il trattamento 2, subito seguito dal trattamento 3, sembra determinare il maggiore incremento di resistenza al gelo.

Gruppo GD: il materiale non trattato si degrada sensibilmente. I trattamenti sperimentati migliorano la resistenza al gelo; in particolare il trattamento 1 sembra il più affidabile.

Complessivamente, il trattamento 1, indipendentemente dalla qualità del materiale, sembra apportare il miglior contributo nella resistenza al gelo. Il contributo di questo trattamento è particolarmente significativo con il materiale degradato, situazione riscontrabile sulla facciata del monumento.

4.8. Resistenza alla corrosione

I provini sono stati posti in una camera a nebbia acida per acido solforico (0,1%) alla temperatura di 35°C. Ogni 24 ore si effettuavano osservazioni al microscopio ottico per seguire l'evoluzione della corrosione. La prova è stata interrotta dopo 96 ore. L'efficacia dei trattamenti è stata valutata attraverso la perdita in massa dei campioni. I risultati sono riportati in tabella 9. Dall'esame dei dati si deduce quanto segue:

Gruppo S: il trattamento 3 porta la maggior resistenza alla corrosione;

Gruppo D: i trattamenti 3 e 1 aumentano la resistenza alla corrosione;

Gruppo GS: il trattamento 2 porta la maggior resistenza alla corrosione;

Gruppo GD: il trattamento 3 aumenta sensibilmente la resistenza alla corrosione.

Complessivamente il trattamento 3 risulta quello che protegge meglio l'arenaria dalla corrosione dovuta all'acido solforico.

5. Conclusioni

Dai dati riportati si può concludere che i trattamenti 1 (Tegosivon V + Tegosivin HL 100) e 3 (Resina silicica 10336 + Silirain 50) risultano i più efficaci nel consolidamento e protezione del litotipo esaminato.

E' tuttavia opportuno far notare che:

- a) il trattamento 1, ha un buon potere consolidante, ma, una volta polimerizzato, lascia come residuo secco un prodotto amorfo, costituito da un acido silicico (gel di silice), con una caratteristica struttura pseudocristallina. Non è a tutt'oggi noto l'effetto di questa struttura che, originando tensioni interne, potrebbe anche arrecar danno alla pietra;
- b) il trattamento 3, nella concentrazione utilizzata nelle prove descritte, non presenta un simile inconveniente, ma il residuo secco inferiore potrebbe portare ad un minor potere consolidante. Un aumento della concentrazione, se da un lato aumenta il residuo secco, dall'altro aumenta anche, sfavorevolmente, la viscosità della soluzione consolidante e la sua penetrazione;
- c) i risultati ottenuti sono riproducibili solo se i trattamenti verranno applicati in loco con le stesse modalità adottate in laboratorio (applicazione per tampone del consolidante) per garantire una sicura e completa penetrazione del consolidante stesso nel materiale lapideo. Si ricorda inoltre che, prima dei trattamenti di consolidamento e protezione, devono essere eseguiti tutti gli interventi necessari per eliminare le eventuali infiltrazioni d'acqua all'interno delle strutture (acqua proveniente da perdite dei tetti o delle grondaie, acqua di risalita dal suolo, ecc.), come pure deve essere eseguita una accurata pulitura dei materiali lapidei (eliminazione di smog ed allontanamento dei sali solubili).

TABELLA 1 - Trattamenti consolidanti

Resina consolidante	Concentrazione (%)	Solvente	Viscosità (CP)	Residuo secco (%)	Modalità applicazione	Ore trattamento	Tempo polimerizzazione a 50°C (giorni)
1 - <u>Tegovakon V</u> (estere dell'acido silicico) Goldschmidt-Tego Italiana	(*)	—	1,98	36	tampone imbibito	72	30
2 - <u>Acrilsiliconica 55050</u> A.R.D. Racanello (**)	66	<u>Aromatico</u> <u>00053</u> A.R.D. Racanello	3,43	8	tampone imbibito	72	30
3 - <u>Siliconica 10336</u> Rhône-Poulenc (**)	20	<u>Solvethane</u> (1-1-1 tricloroetano) Dollmar	2,31	8	tampone imbibito	72	30

(*) Come fornita dalla Ditta.

(**) Prima dell'applicazione del consolidante i campioni sono stati bagnati con solo solvente per 60 minuti.

(***) La viscosità delle soluzioni consolidanti è stata determinata con viscosimetro a cilindri; la temperatura delle soluzioni durante la misura era 20°C.

TABELLA 2 - Trattamenti protettivi

Trattamento protettivo	Concentrazione (%)	Solvente	Modalità di applicazione
1 - <u>Idrorepellente siliconico</u> <u>Tegosivin HL 100</u> Goldschmidt Tego Ital.	come fornito dalla Ditta	—	pennello
2 - <u>Resina acrilica 56415</u> con opacizzante A.R.D. Racanello	50	<u>aromatico 200999</u> A.R.D. Racanello	pennello
3 - <u>Idrorepellente siliconico</u> <u>Silirain 50</u> Rhône-Poulenc	come fornito dalla Ditta	—	pennello

TABELLA 3 - Capacità di imbibizione

	Capacità di imbibizione (%)			
	Non trattato	Tratt. 1	Tratt. 2	Tratt. 3
Gruppo S	2,32	1,63	2,07	1,61
Gruppo D	3,74	2,50	3,45	2,68
Gruppo GS	1,36	0,63	0,66	0,56
Gruppo GD	—	—	—	—

TABELLA 4a - Misure porosimetriche: Gruppo S

ρ_a (g/cm ³)	d_f (μ m)	P (%)	Non trattato	Trattamento 1		Trattamento 2		Trattamento 3	
				I strato	III strato	I strato	III strato	I strato	III strato
2,28			2,28	2,50	2,65	2,23	2,57	2,45	2,26
0,013			0,011	0,007	0,007	0,010	0,012	0,012	0,030
4,5			4,0	4,3	4,3	5,4	4,9	4,1	3,8
0,33			0,35	0,62	0,62	0,53	0,35	0,29	0,00
0,44			0,33	0,32	0,32	0,39	0,41	0,28	0,27
0,41			0,45	0,47	0,47	0,56	0,49	0,41	0,41
0,88			0,94	0,92	0,92	1,01	0,92	0,81	0,73
0,53			0,51	0,61	0,61	0,45	0,59	0,41	0,51
0,45			0,25	0,24	0,24	0,24	0,47	0,27	0,36
0,51			0,28	0,27	0,27	0,53	0,50	0,33	0,52
0,33			0,23	0,21	0,21	0,51	0,40	0,28	0,36
0,20			0,24	0,25	0,25	0,61	0,20	0,38	0,25
0,01			0,08	0,05	0,05	0,20	0,12	0,34	0,03
0,38			0,32	0,32	0,32	0,36	0,43	0,27	0,35

Nota:

 ρ_a : massa volumica apparente d_f : diametro dei pori corrispondente all'ultima penetrazione

P : porosità aperia integrale

TABELLA 4b - Misure porosimetriche: Gruppo D

	Non trattato	Trattamento 1		Trattamento 2		Trattamento 3	
		I strato	III strato	I strato	III strato	I strato	III strato
ρ_a (g/cm ³)	2,32	2,33	2,44	2,33	2,12	2,65	2,62
d_f (μ m)	0,010	0,008	0,008	0,008	0,013	0,016	0,013
P (%)	6,5	3,8	3,7	4,2	4,4	4,6	4,2
P% con $d < 0,05$ μ m	0,75	0,31	0,44	0,19	0,35	0,46	0,20
P% con $0,05 < d < 0,1$ μ m	0,45	0,24	0,25	0,34	0,32	0,18	0,23
P% con $0,1 < d < 0,2$ μ m	0,49	0,44	0,34	0,43	0,44	0,41	0,38
P% con $0,2 < d < 0,4$ μ m	0,98	0,86	0,58	0,81	0,74	0,81	0,80
P% con $0,4 < d < 0,6$ μ m	0,47	0,42	0,32	0,27	0,37	1,00	0,68
P% con $0,6 < d < 0,8$ μ m	0,30	0,18	0,18	0,22	0,20	0,73	0,47
P% con $0,8 < d < 1$ μ m	0,60	0,28	0,29	0,38	0,36	0,59	0,45
P% con $1 < d < 2$ μ m	0,60	0,22	0,29	0,40	0,36	0,27	0,30
P% con $2 < d < 4$ μ m	0,63	0,28	0,42	0,48	0,45	0,09	0,19
P% con $4 < d < 10$ μ m	0,27	0,14	0,24	0,16	0,28	0,00	0,03
P% con $d > 10$ μ m	0,94	0,41	0,34	0,51	0,51	0,47	0,46

Nota:

 ρ_a : massa volumica apparente d_f : diametro dei pori corrispondente all'ultima penetrazione

P : porosità aperta integrale

TABELLA 4c - Misure porosimetriche: Gruppo GS

	Non trattato	Trattamento 1		Trattamento 2		Trattamento 3	
		I strato	III strato	I strato	III strato	I strato	III strato
ρ_a (g/cm ³)	2,29	2,47	2,45	2,40	2,52	2,32	2,26
d_f (μm)	0,012	0,008	0,012	0,013	0,011	0,011	0,012
P (%)	2,0	1,6	2,0	1,5	2,0	1,5	1,6
P% con $d < 0,05$ μm	0,37	0,61	0,47	0,66	0,58	0,42	0,53
P% con $0,05 < d < 0,1$ μm	0,55	0,02	0,12	0,16	0,29	0,20	0,31
P% con $0,1 < d < 0,2$ μm	0,39	0,24	0,19	0,21	0,24	0,20	0,22
P% con $0,2 < d < 0,4$ μm	0,28	0,15	0,17	0,10	0,15	0,07	0,12
P% con $0,4 < d < 0,6$ μm	0,06	0,02	0,05	0,03	0,07	0,07	0,03
P% con $0,6 < d < 0,8$ μm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,01	0,00
P% con $0,8 < d < 1$ μm	0,02	0,00	0,02	0,00	0,03	0,03	0,00
P% con $1 < d < 2$ μm	0,02	0,00	0,06	0,00	0,05	0,05	0,00
P% con $2 < d < 4$ μm	0,08	0,06	0,18	0,04	0,08	0,10	0,03
P% con $4 < d < 10$ μm	0,00	0,00	0,04	0,00	0,04	0,05	0,00
P% con $d > 10$ μm	0,21	0,49	0,69	0,29	0,42	0,29	0,34

Nota:

ρ_a : massa volumica apparente

d_f : diametro dei pori corrispondente all'ultima penetrazione

P : porosità aperta integrale

TABELLA 4d - Misure porosimetriche: Gruppo GD

	Non trattato	Trattamento 1		Trattamento 2		Trattamento 3	
		I strato	III strato	I strato	III strato	I strato	III strato
ρ_a (g/cm ³)	2,29	2,74	2,43	2,53	2,35	2,55	2,52
d_f (μm)	0,015	0,011	0,008	0,009	0,014	0,009	0,012
P (%)	1,8	1,7	1,7	2,5	1,7	1,7	1,6
P% con $d < 0,05$ μm	0,15	0,69	0,55	0,65	0,45	0,68	0,75
P% con $0,05 < d < 0,1$ μm	0,50	0,14	0,06	0,62	0,26	0,22	0,36
P% con $0,1 < d < 0,2$ μm	0,37	0,24	0,22	0,45	0,21	0,20	0,33
P% con $0,2 < d < 0,4$ μm	0,25	0,10	0,27	0,30	0,18	0,08	0,18
P% con $0,4 < d < 0,6$ μm	0,03	0,07	0,13	0,06	0,05	0,05	0,03
P% con $0,6 < d < 0,8$ μm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00
P% con $0,8 < d < 1$ μm	0,01	0,00	0,00	0,00	0,05	0,01	0,00
P% con $1 < d < 2$ μm	0,02	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00
P% con $2 < d < 4$ μm	0,11	0,04	0,04	0,00	0,06	0,04	0,01
P% con $4 < d < 10$ μm	0,06	0,03	0,04	0,02	0,11	0,00	0,00
P% con $d > 10$ μm	0,27	0,37	0,37	0,32	0,29	0,37	0,43

Nota:

ρ_a : massa volumica apparente

d_f : diametro dei pori corrispondente all'ultima penetrazione

P : porosità aperta integrale

TABELLA 5a - Resistenza alla cristallizzazione: comportamento dei campioni in funzione del numero di cicli

Gruppo S						
	4 cicli	5 cicli	7 cicli	11 cicli	17 cicli	20 cicli
Non trattato	molto degradato	molto degradato	molto degradato	disgregazione campione		
Tratt. 1	integro	inizio corrosione	corrosione	inizio distacco frammenti	distacco frammenti	aumento perdita
Tratt. 2	integro	inizio corrosione	inizio distacco frammenti	disgregazione campione		
Tratt. 3	integro	inizio corrosione	corrosione	inizio distacco frammenti	disgregazione campione	

TABELLA 5b - Resistenza alla cristallizzazione: comportamento dei campioni durante la prova

Gruppo D					
	3 cicli	5 cicli	11 cicli	17 cicli	20 cicli
Non trattato	molto degradato	disgregazione campione	_____	_____	_____
Tratt. 1	integro	inizio distacco frammenti	disgregazione campione	_____	_____
Tratt. 2	distacco frammenti	disgregazione campione	_____	_____	_____
Tratt. 3	integro	inizio corrosione	inizio distacco frammenti	disgregazione campione	_____

TABELLA 5c - Resistenza alla cristallizzazione: comportamento dei campioni durante la prova

Gruppo GS				
Non trattato	5 cicli	11 cicli	16 cicli	20 cicli
	integro	inizio distacco frammenti	distacco frammenti	fessurazioni e distacco frammenti
Tratt. 1	integro	integro	inizio distacco frammenti	distacco piccoli frammenti
Tratt. 2	integro	inizio distacco frammenti	distacco frammenti	distacco frammenti
Tratt. 3	integro	integro	integro	integro

TABELLA 5d - Resistenza alla cristallizzazione: comportamento dei campioni durante la prova

Gruppo GD					
Non. trattato	4 cicli	5 cicli	11 cicli	18 cicli	20 cicli
	distacco frammenti	disgregazione campione	_____	_____	_____
Tratt. 1	integro	inizio corrosione	inizio distacco frammenti	distacco frammenti	distacco frammenti
Tratt. 2	inizio distacco frammenti	disgregazione campione	_____	_____	_____
Tratt. 3	integro	integro	distacco frammenti	disgregazione campione	_____

TABELLA 6 - Perdita in massa subita nella prova di cristallizzazione

	Perdita in massa (%)			
	Non trattato	Tratt. 1	Tratt. 2	Tratt. 3
Gruppo S	—	20,00	—	—
Gruppo D	—	—	—	—
Gruppo GS	1,70	0,19	1,80	0,08
Gruppo GD	—	27,70	—	—

TABELLA 7a - Resistenza al gelo: comportamento dei campioni durante la prova

		Gruppo S				
Non trattato		10 cicli	15 cicli	20 cicli	30 cicli	50 cicli
		polverino	polverino	polverino	polvere e scaglie	polvere e scaglie
Tratt. 1		10 cicli	15 cicli	20 cicli	30 cicli	50 cicli
		polverino	polverino	polverino	polvere e scaglie	polvere e scaglie
Tratt. 2		10 cicli	15 cicli	20 cicli	30 cicli	50 cicli
		polverino	polverino	polverino	polvere e scaglie	polvere e scaglie
Tratt. 3		10 cicli	15 cicli	20 cicli	30 cicli	50 cicli
		polverino	polverino	polverino	polvere e scaglie	polvere e scaglie

TABELLA 7b - Resistenza al gelo: comportamento dei campioni durante la prova

Gruppo D						
	10 cicli	15 cicli	20 cicli	30 cicli	50 cicli	63 cicli
Non trattato	frammenti	frammenti	aumento frammenti	inizio disgregazione	disgregazione	<u>63 cicli</u>
Tratt. 1	inizio polverino	polverino	polverino	frammenti	frammenti	frammenti
Tratt. 2	polverino	polverino	polverino	polverino	scaglie frammenti	scaglie frammenti
Tratt. 3	inizio frammenti	frammenti	frammenti	frammenti	scaglie frammenti	scaglie frammenti

TABELLA 7c - Resistenza al gelo: comportamento dei campioni durante la prova

		Gruppo GS				
		10 cicli	15 cicli	20 cicli	30 cicli	50 cicli
		polvere frammenti	aumento polvere frammenti	aumento polvere frammenti	aumento polvere frammenti	63 cicli aumento polvere frammenti
Non trattato						
Tratt. 1		polverino	polverino	polverino	polverino	polverino
Tratt. 2		integro	integro	integro	frammenti	frammenti
Tratt. 3		inizio frammenti	frammenti	frammenti	polverino frammenti	polverino frammenti

TABELLA 7d - Resistenza al gelo: comportamento dei campioni durante la prova

Gruppo GD							
Non trattato	10 cicli	15 cicli	20 cicli	30 cicli	50 cicli	63 cicli	
	polvere frammenti	aumento frammenti	aumento frammenti	aumento frammenti	inizio disgregazione	disgregazione	
Tratt. 1	inizio frammenti	frammenti	frammenti	frammenti	polvere frammenti	polvere frammenti	
Tratt. 2	rari frammenti	rari frammenti	frammenti	frammenti	frammenti	frammenti fratture	
Tratt. 3	inizio polverino	polverino	polverino	polverino	fratture	frammenti fratture	

TABELLA 9 - Perdita in massa subita nella prova di corrosione

	Perdita in massa (%)			
	Non trattato.	Tratt. 1	Tratt. 2	Tratt. 3
Gruppo S	0,22	0,17	0,18	0,14
Gruppo D	0,49	0,40	0,47	0,38
Gruppo GS	0,17	0,15	0,10	0,13
Gruppo GD	0,57	0,44	0,35	0,31

Gruppo S

nero : Non tratt.
verde : Tratt. 1
blu : Tratt. 2
rosso : Tratt. 3

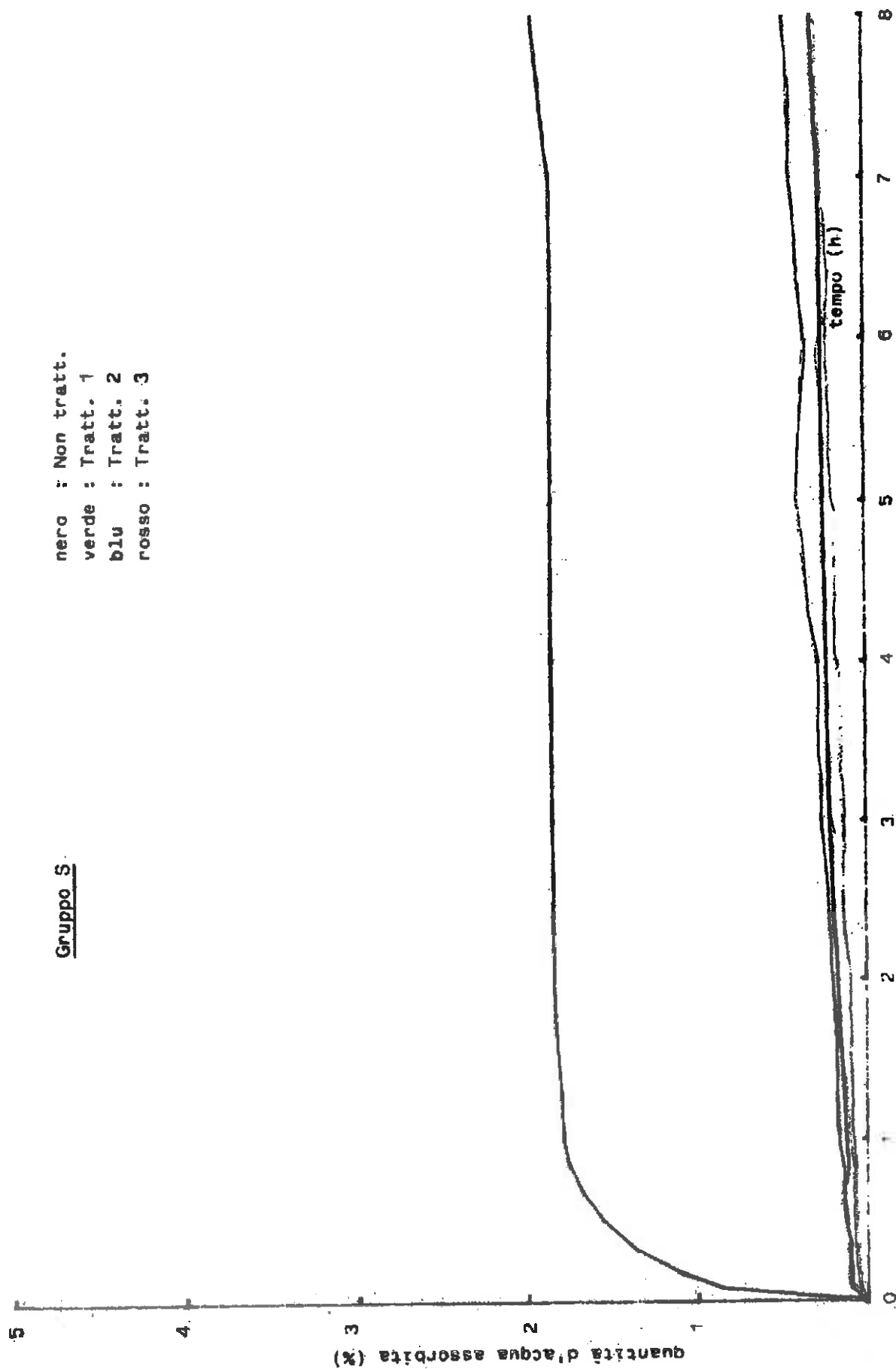


Fig. 1a

Gruppo S

nero : Non tratt.
verde : Tratt. 1
blu : Tratt. 2
rosso : Tratt. 3

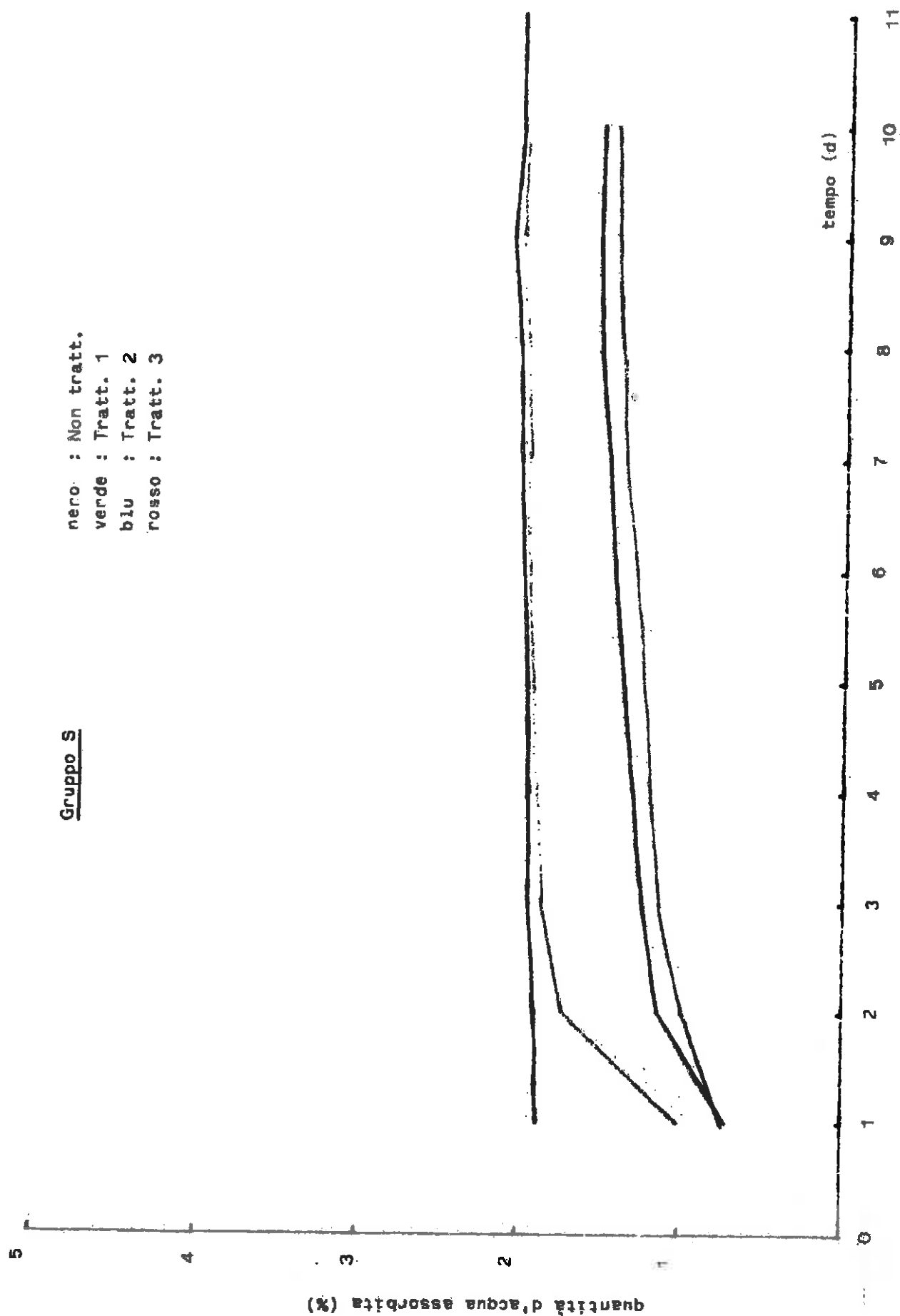


Fig. 1b

Gruppo D

nero : Non tratt.
verde : Tratt. 1
blu : Tratt. 2
rosso : Tratt. 3

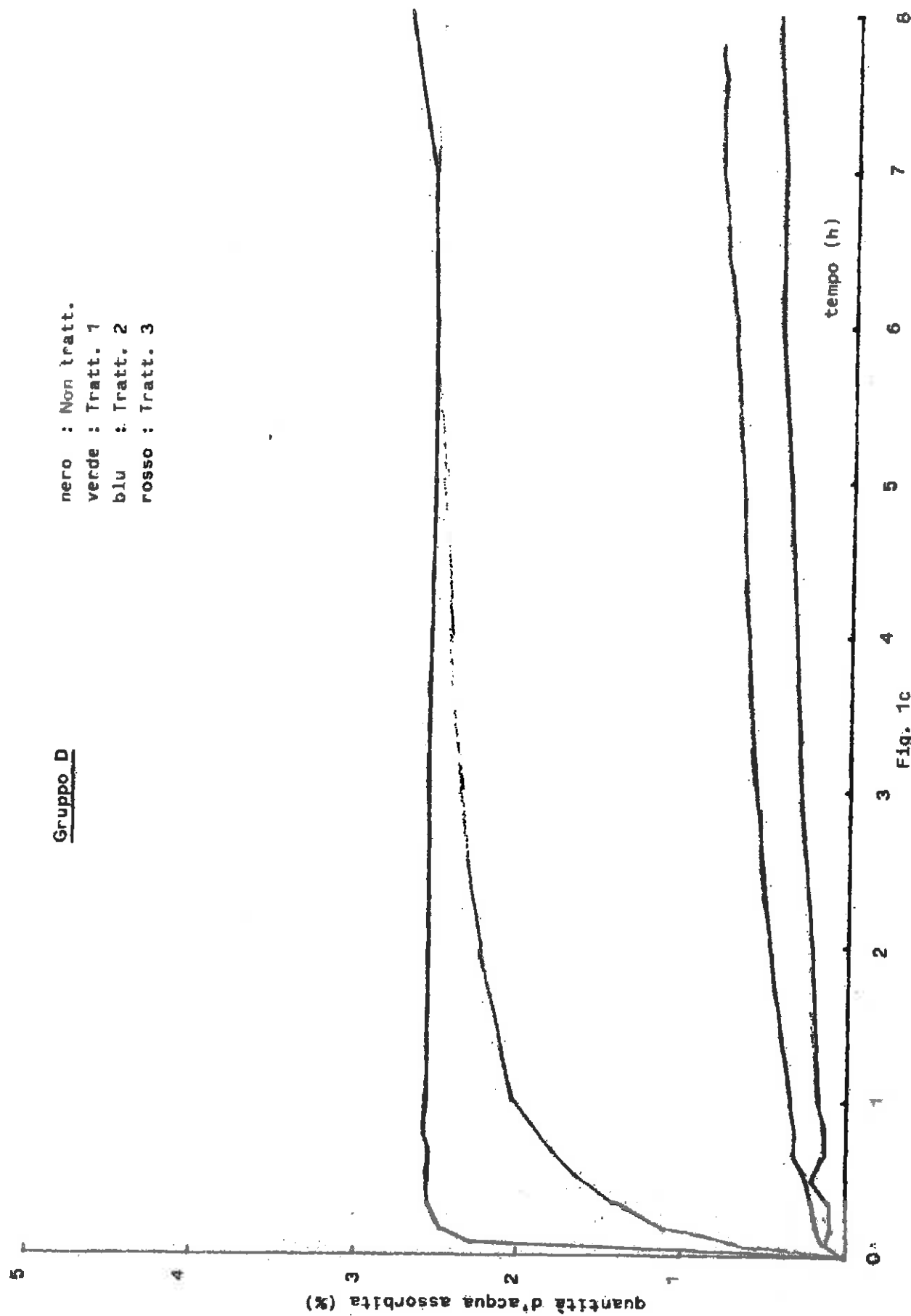
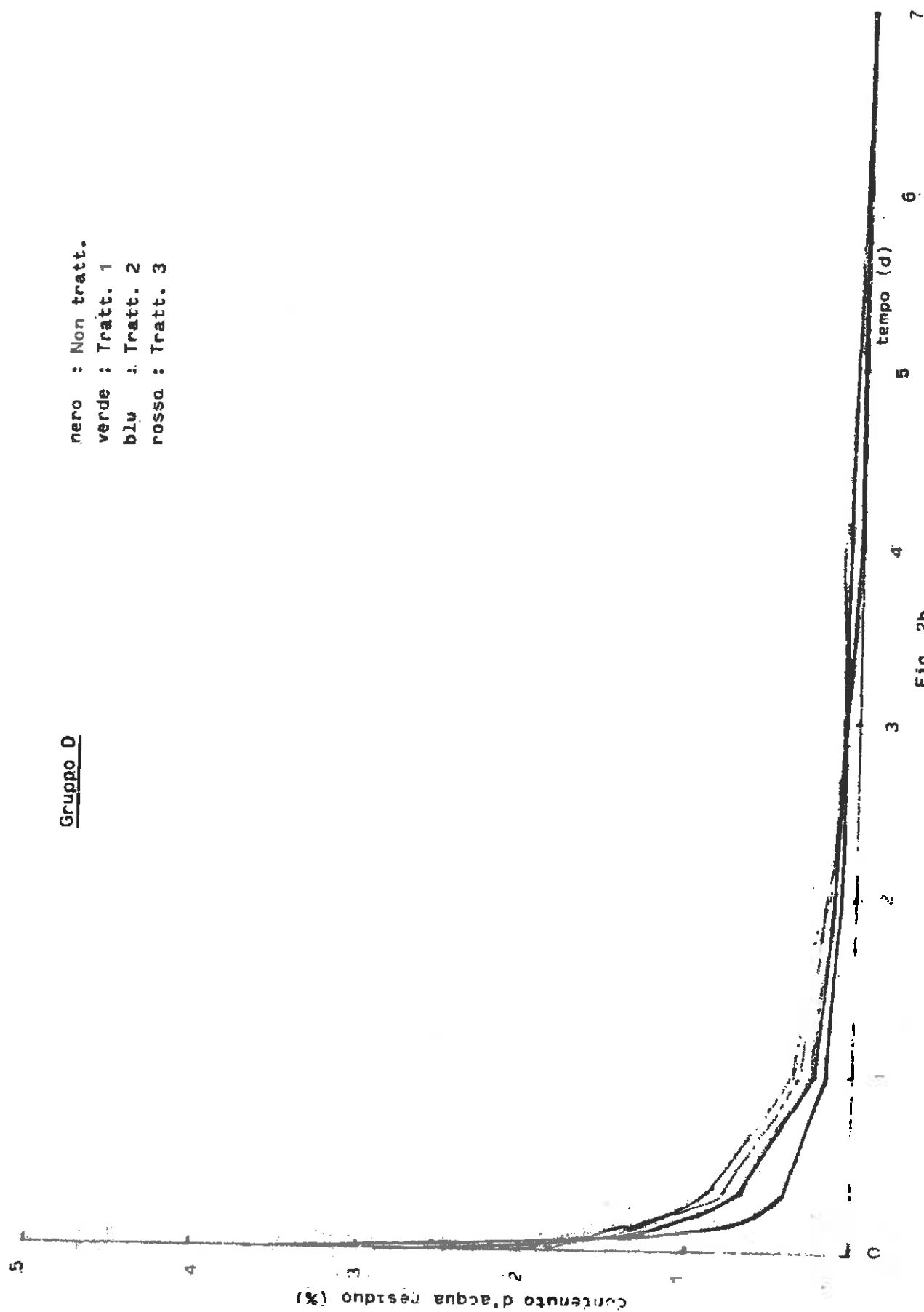


Fig. 1c

Gruppo D

nero : Non tratt.
verde : Tratt. 1
blu : Tratt. 2
rosso : Tratt. 3



Gruppo GS

nero : Non tratt.
 verde : Tratt. 1
 blu : Tratt. 2
 rosso : Tratt. 3

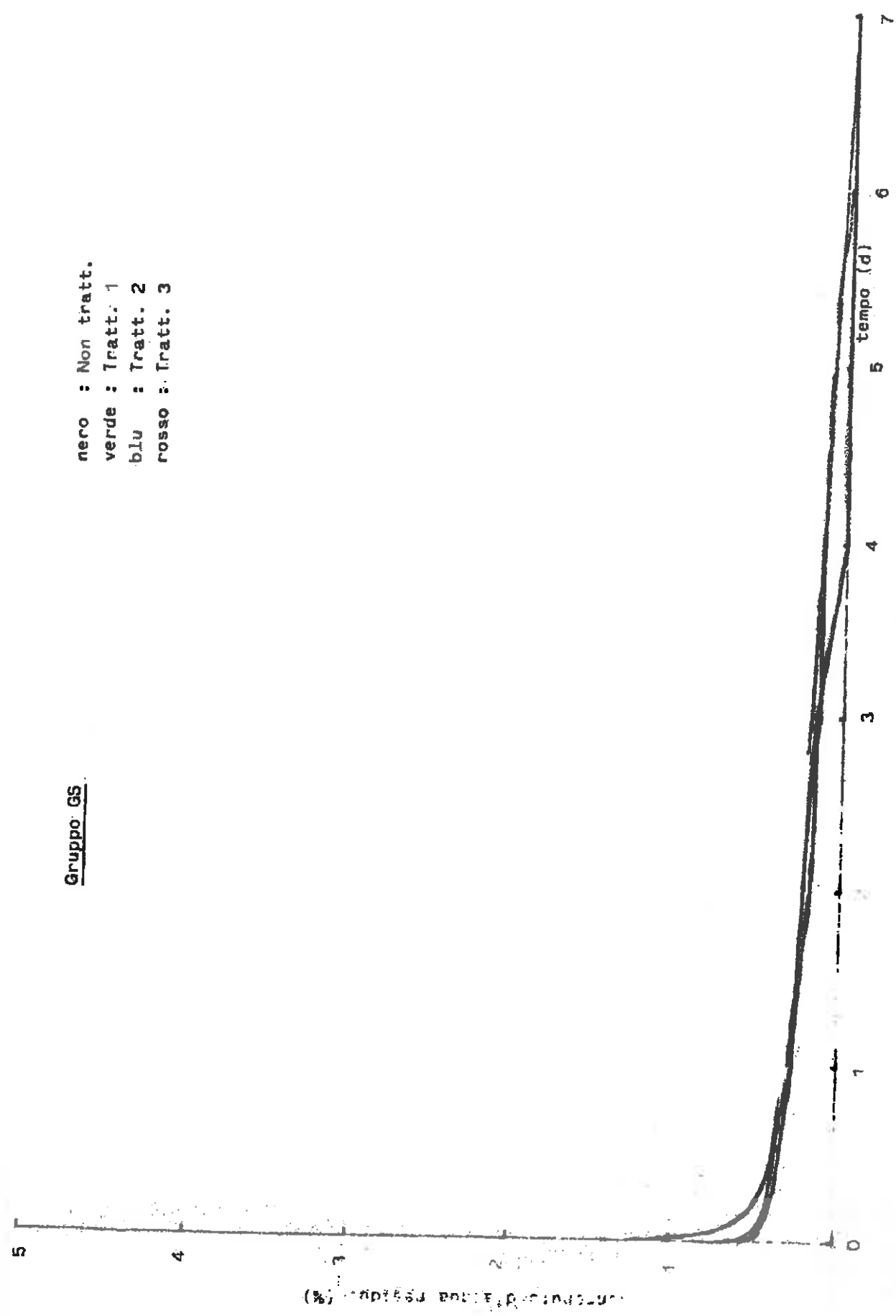


Fig. 2c